ワイヤ放電加工の加工精度の向上

特殊加工研究室

指導教員　小林和彦

知能機械システム工学コース

1075037

小山　彰博

《　目次　》

第 1 章　緒論

1.1　ワイヤ放電加工機について----------4
1.2　電源装置----------5
1.3　加工精度----------7
1.4　研究目的----------9
1.5　本論文の構成----------9

第2章　　セカンドカットの加工特性

2.1　緒言----------10
2.2　実験機器及び加工条件----------12
　2.2.1　実験機器----------12
　2.2.2　加工条件表----------15
2.3　セカンドカット加工における加工面粗さ----------17
2.4　加工送り速度と切り込み量による加工面粗さ及び除去厚さの関係----------25
　2.4.1　加工送り速度と切り込み量による加工面粗さの関係----------25
　2.4.2　加工送り速度と切り込み量による除去厚さの関係----------36
2.5　セカンドカット加工における加工限界の選定及び最適除去厚さの式の検討----------42
　2.5.1　セカンドカットにおける加工限界の選定----------42
　2.5.2　加工送り速度と切り込み量における最適除去厚さの関係式----------45
2.6　結言----------47

第3章　テーパカット加工の加工精度向上

3.1　緒言----------48
3.2　テーパカット加工について----------49
3.3　研究目的----------49
3.4　実験機器及び加工条件表----------50
3.4.1　実験機器----------50
3.4.2　加工条件表----------51
3.5　諸元出し方法----------52
3.5.1　Ｚ軸諸元----------52
3.5.2　諸元出し方法----------53
3.6　テーパ角度の測定方法----------54
3.6.1　テーパ加工面の角度測定方法----------54
3.7　テーパ加工実験----------55
3.7.1　テーパ加工後のワークのテーパ面角度の調査実験----------55
3.7.2　ワイヤテンションの変化に対するテーパ角度誤差と加工状態の変化----------58
3.7.3　加工後の角度誤差を補正値として加工を行う実験----------63
3.8　諸元出しについての検討----------67
3.8.1　諸元出し方法を用いたワイヤの傾き角度の測定方法の検討----------67
3.8.2　新諸元出し方法----------71
3.8.3　従来諸元出し方法新諸元出し方法の加工実験及び比較----------72
3.9　高速・高精度デジタル寸法測定器レーザ測定器を用いた新たな測定方法の検討-------76
3.9.1　高速・高精度デジタル寸法測定器レーザ測定器を用いたワイヤの傾き角度の調査----------76
3.9.2　高速・高精度デジタル寸法測定器レーザ測定器を用いてワイヤ幅の変化によるワイヤ傾き角度の調査及び加工実験----------80
3.10　結言----------84

第 4 章　結論----------85
謝辞----------86
参考文献----------86

第１章　緒論

1.1　ワイヤカット放電加工機について

放電加工とは銅、グラファイトなどの比較的に加工しやすい導電性の材料を工具電極とし、鋼、超硬合金などの被加工物材料との間に 60～300V 程度のインパルス電圧を印加しながら,間欠的火花放電を行わせ、その際に発生する異常消耗現象を利用した加工法である。電極と被加工物の対向する極間間隙長は非常に狭く、5～50um である。また気中放電では加工が進まないので、加工液にはケロシン(灯油)や水などの絶縁体を介在させる。

ワイヤカット放電加工法のメカニズムとしては上記のとおりであるが、電極としてワイヤを用いる点が異なっている。

ワイヤカット放電加工法は電極として、ワイヤを用いる。ワイヤ材料としては、銅、黄銅、タングステンなどの細いワイヤ電極により被加工物を糸鋸式に加工する。被加工物を積載しているクロステーブルは、NC 制御サーボモータ駆動により X、Y 軸方向に送りが与えられ、2 次元形状の加工がおこなわれる。（ワイヤ放電加工機の加工原理図は図 1.1 に示す。）

ワイヤは供給リールから常に一定の速度(1～3mm/min)で送り出され、放電による電極消耗を補正している。ワイヤ径は通常φ0.05～0.25mm であるが、加工効率やワイヤ切れ、トラブル防止などを考慮して、φ0.1mm 以上のワイヤが多く用いられている。ワイヤは放電圧力などによる強制振動をできる限り小さく抑えるため常に変動のないテンションをかけていることが必要である。それらの値はワイヤ破断力の 1/2 程度で、φ0.2mm の黄銅ワイヤなら 800～1500g が一般的である。

加工液は、水あるいはケロシンが用いられるが、取り扱いが容易で火災の心配がなく、加工部分とワイヤの冷却がよく、さらにワイヤの強制振動があっても極間に短絡が発生しない程度の広い間隙を形成し、また加工紛の排除が良好であり、炭化物やタールの発生がなく極間の清浄化がなされ易いことにより加工を安定に保つことができるということなどの理由から、現在ではほとんど水が加工液として使用されている。

加工送り速度は、被加工物材質、板厚、ワイヤの種類などで変化するが、現在知られている最大加工送り速度は板厚 60mm鋼（SKD-11）を加工する場合で、300mm²/min 程度が可能となっている。つまり、加工送り速度に換算すれば、5mm/min になり、レーザ加工機に比べれば、それほど速くはないが、加工精度が極めて高いので、高精度金型や部品加工にとって重要な加工法である。

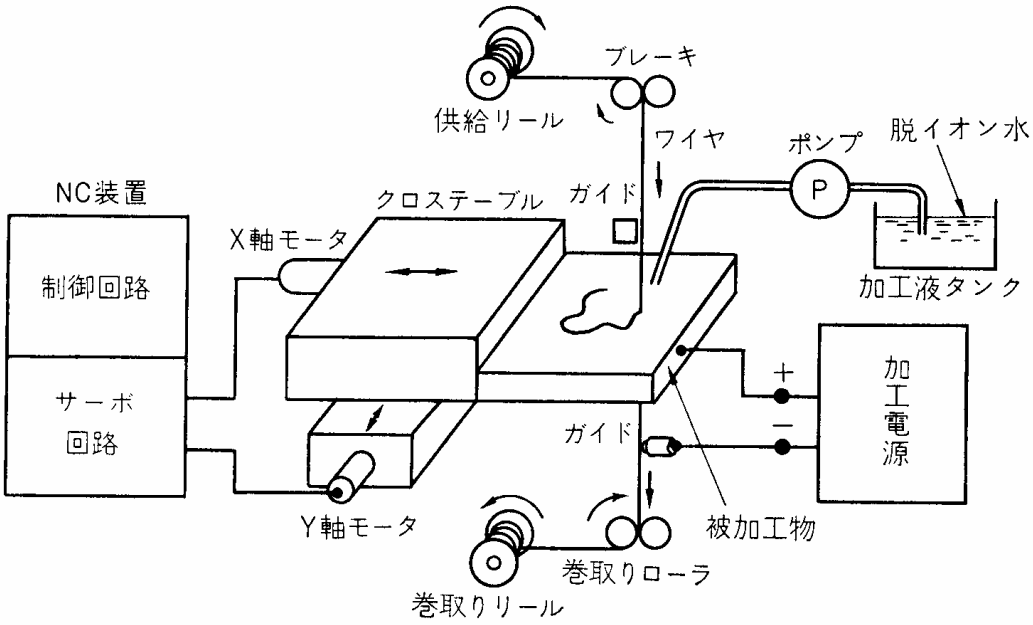


図 1.1　ワイヤ放電加工機の加工原理図

1.2　電源装置

ワイヤ放電加工機は形彫り放電加工機と違い、面粗さに対する加工速度を高めるため、パルス幅が狭く電流のピーク値の高いパルス電流を発生させることが必要である。現在、これを実現させるための回路方式としては、図 1,2 に示すいくつかの方式が用いられている。

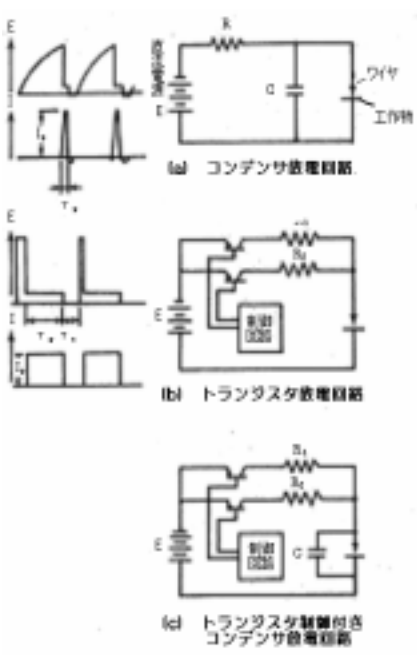


図 1.2　電源装置の回路方式

図 1.2.(a)は、最も基本的な回路であり、コンデンサ放電回路（RC 回路）と呼ばれている。コンデンサ C に充電抵抗 R を通していったん電化を蓄積し、極間の絶縁破壊によって、パルス幅が極めて短くピーク値の高い放電電流パルスを発生させる方式である。しかし、コンデンサの充放電が加工間隙によって支配されるため、均一な放電エネルギーによる加工が難しい。またアーク放電に移行しやすいという欠陥があるため、加工電流を多く投入できず、加工速度が遅い。

図 1.2.b)は形彫り放電加工機で広く使用されているトランジスタ放電回路である。直流電源からスイッチング用トランジスタと電流制限用の抵抗器を通して、

トランジスタの ON-OFF によって矩形波電圧が極間に加えられ、放電の発生時に抵抗器によって制限された 矩形波電流が流れる。この方式の特徴は高周波トランジスタを用いることにより、パルス幅の狭いパルス電流が得られる。またトランジスタを並列にし、抵抗値を 0Ω付近まで減少させることにより、極めて高い電流ピーク値が得られるため、現在ではこの回路が主流となっている。

図 1.2.(c)はトランジスタ制御付きコンデンサ放電回路である。パルス幅が狭い割には電流ピーク値が大きいという特徴があり、またトランジスタで電流がパルス的に遮断され、アークを引きやすいという欠点が改善されるという実用的な回路である。また現在では、電流の小さい所で、電流を制御しやすいという特徴を利用して、仕上げ用回路としても利用されている。

図 1.2 の電源回路方式で発生するパルスは、基本的に単極性であるため微小な電解電流が流れ、比抵抗の小さい加工液中で加工すると、加工面に陽極酸化や錆びが生じる場合がある。

しかし、図 1.3 に示す、両極性パルス発生回路方式で行うと、無電解放電加工が行える。これは陽極酸化や錆びを防止するだけでなく、超硬合金などの加工において、バインダーの溶出などがなくなり、強度の低下を防止できるなど大きな威力を発揮する。

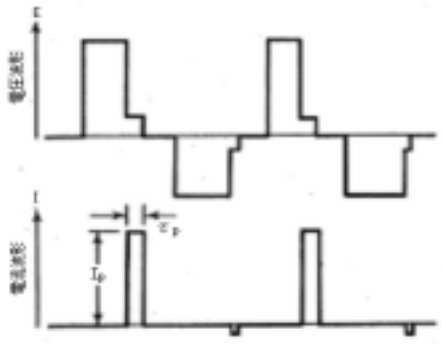


図 1.3　両極性パルス発生方式による電圧、電流波形

放電パルスによる加工速度を考える場合、方形波の場合で考え、図 1.3 におけるパルス幅(on-time)を$\tau_p(s)$、電流ピーク値を$I_p(A)$、放電電圧を$e_g(V)$(ほぼ 20V 一定)とすれば単発放電エネルギー$p(J)$は

$$p = e_g \cdot \tau_p \cdot I_p \cdots(1)$$

となる。

また加工中の平均的な休止時間(off-time)を$\tau_r(s)$とすれば、連続放電周波数は

$$\frac{1}{\tau_p + \tau_r}$$

となるので、加工中の連続放電エネルギー$P(W)$は次式のようになる。

$$P = m \cdot \frac{1}{\tau_p + \tau_r}$$
$$= \frac{e_g \cdot I_p \cdot \tau_p}{\tau_p + \tau_r}$$
$$= e_g \cdot I \cdots (2)$$

ここでIは加工中の平均加工電流(A)である。

(1)、(2)の式により、加工速度を上げるためには平均加工電流を上げればいいと考えられるが、ワイヤに流すことのできる電流は限度がある。したがって、$\tau_p \cdot I_p$ =(一定)のもとで、パルス幅τ_pをできるだけ狭く、電流ピーク値I_pをできるだけ高くするのが望ましいとされている。実際の電流波形では$\tau_p = 1 \sim 3\mu s$、$I_p = 1000A$を超えるようなものも実現されている。

1.3　加工精度

ワイヤ放電加工の加工精度については、①加工物寸法精度(形状精度、真直精度)、②ピッチ寸法精度、③位置決め精度、④コーナ形状精度の四つに分類される。

加工物寸法精度は、形状精度と真直精度に分けることが出来る。まず形状精度については、一般的に図面形状等の寸法に基づいて NC データをつくり、これにワイヤ径の半分に放電間隙を加えた値をワイヤオフセット量として、補正して加工を行う。したがって、寸法精度は機械の送り量とワイヤオフセット量によって決められる部分が多く、被加工物のひずみや変形、室温、液温、比抵抗の変化等の条件が加わり、総合的な寸法精度が求められる。

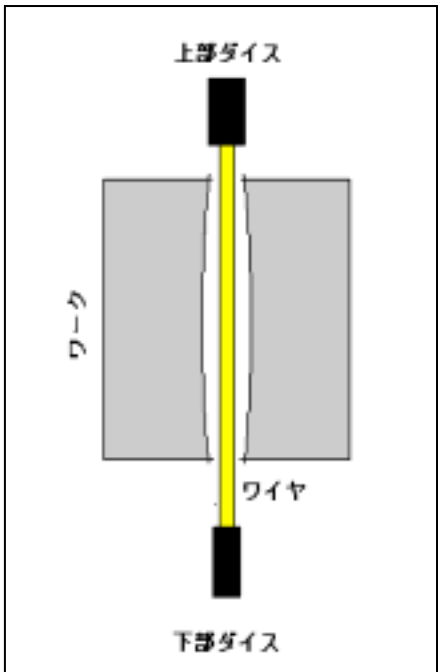


図 1.4　真直精度(太鼓形状)図

真直精度は図 1.4 に示すようにワイヤカット放電加工法の特有の精度誤差であり、加工溝幅の上下方向の形状において、中膨らみが生じ、その結果真直度に誤差が生じる。その要因として、ワイヤの振動、加工液比抵抗の変化、加工粉による二次放電、加工条件が考えられる。まず、ワイヤの振動については、ワイヤ張力を大きくすることによって、ワイヤの振動小さくすることができる。次に、加工中における被加工物の中央部は加工粉や金属イオンによって、比抵抗の低下し、

絶縁耐力が低下するため、放電が起こりやすい状態になるので放電間隙(溝幅)が大きくなる。したがって、この影響を小さくするためにはジェットノズルを使用し、上部から直接、被加工物に向けて噴射し、加工液を極間に供給することが必要となる。また板厚が厚くなることによって真直精度の影響が大きくなり、精度が悪化する。

順送型や複合型では、ピッチ寸法精度が非常に重要となっている。しかしながら現在のワイヤ放電加工機においては位置決め精度、が 2μm 以下の高精度が実現されている。ピッチ寸法精度を満足されるために、以下のことを留意する必要がある。

(1) 室内と加工液の温度はできる限り一定にする。

(2) 加工溝幅に影響を及ぼす諸条件は加工中一定に保つ。

(3) 被加工物の残留応力が加工により、解放されると変形するので、荒加工後、セカンドカット法により、精度出しを行う。

位置決め方法は穴基準による方法と端面位置決めによる方法とがある。検出方法はワイヤと基準面との接触感知で行い、基準面を自動的に求める方法がある。

コーナ形状精度はワイヤ放電加工において最も精度が出しづらい部類にある。インコーナ加工においてはオフセット分だけの R がつき、アウトコーナ加工においては放電反力よって生じるワイヤの遅れによる誤差が大きい。またコーナ部分のだれは鋭角に曲がるほど大きくなっている。

1.4　研究目的

ワイヤカット放電加工機の加工精度においては、コーナー加工精度、位置決め精度、ピッチ間寸法精度、加工面寸法精度等があげられる。ワイヤカット放電加工機に限らず、最近のものづくりの現場に要求される加工精度は高等の一途をたどっている。携帯電話に代表されるように移動通信機器のめまぐるしいモデルチェンジと、そのたびに小型化や軽量化が一段と進んでいる現状が、高精度競争に拍車をかけている。

本研究では、セカンドカット加工法の加工特性、テーパカット加工法の加工精度向上について、加工精度に影響を与える因子に着目しながら、加工状態の解析、誤差の発生割合を数式を用いて検討するなどし、ワイヤ放電加工機の加工精度向上を目的として研究を行った。

1.5　本論文の構成

第 1 章「緒論」では、ワイヤ放電加工機の原理、本研究の目的、本論文の構成について述べた。

第 2 章「セカンドカットの加工特性」では、ワイヤ放電加工におけるセカンドカット加工法はファーストカット後にワイヤを幅寄せして､片側だけで加工を行う加工法であり､加工条件、加工送り速度等によって、加工精度、加工面粗さ精度等に影響が出ることが分かっている。

本研究では広範囲にわたって切り込み量、加工送り速度、ワークの板厚を種々変化させて実験を行い、セカンドカット加工法における切り込み量（幅寄せ量）と加工送り速度の最適化を図った。

第 3 章「テーパカットの加工精度の向上」では、ワイヤを目的の角度に傾ける時、テーパ角度が大きくなるに従い、加工後のテーパ加工誤差も大きくなってしまうことが分かっている。

本研究では誤差の発生原因の追求、諸元出し段階における測定誤差に対して、数式等を用い、誤差の発生割合などを調査し、改善策について検討を行った。

第 2 章　セカンドカット加工の加工特性

2.1　緒言

ワイヤ放電加工には、加工対象物により要求される加工精度より大別して、二通りの加工方法がある。ファーストカット(荒加工)だけで終わる方法と、セカンドカット(仕上げ加工)を適用する方法がある。ファーストカットとは、要求される寸法誤差が±0.05mm 程度で、面粗さが 15μmRy 程度前後の場合に用いられ、プログラムされた図形を一筆書きで一周して加工を終了させる方法である。精度をある程度、犠牲にしても緊急に製品が必要な場合にこの方法が用いられる。しかしファーストカットだけで加工を終わらせた場合、加工精度の観点から、いろいろな問題が残り、高精度を要求される加工には適用が非常に難しい。したがって、これを解決するためにセカンドカット加工法がある。加工歪みなどを考慮して、仕上げ代を残し、荒加工としてファーストカットを行い、残った仕上げ代をオフセット量と電気条件を少しずつパワーの低い電気条件に切り換え、数段階に分けて仕上げていく方法である。2 回目から最終回(2nd、3rd、4th,…)の仕上げ加工を総称して、セカンドカット加工と呼んでいる。オフセット量とは図 2.1 に示すように、残した仕上げ代を最終仕上がり形状まで加工していくプロセスの中で、プログラム上の軌道をゼロとし、そこからワイヤ径補正(H2、H3、H4)をかけた値のことである。ワイヤ径補正は、ワイヤの半径と放電クリアランスを足したものであり、電気条件も変化すると、その値も変化する。

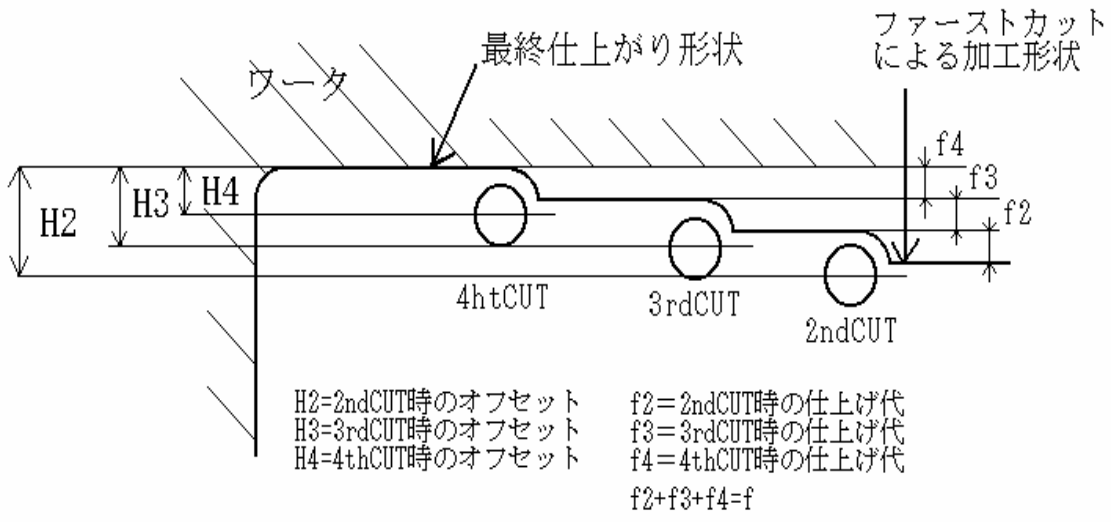


図 2.1　セカンドカット加工法の加工プロセス

セカンドカットの特徴

（ａ）コーナ部のだれを解消して、はめあい精度を向上させる。

（ｂ）太鼓形状を修正し、加工面の真直度を改善する。

（ｃ）加工表面に残った変質層を除去し、型寿命を伸ばす。

（ｄ）“ へそ ” を取り除く。

などが知られている。しかし必要以上にセカンドカットの回数を増やすことは、当然加工時間が長くなることや、ワイヤの消費量を大きくしてしまうのが問題としてとりあげられる。これらを改善していくためには、セカンドカットの仕上げ段階を明らかにし、セカンドカット加工のメカニズムを十分に理解が必要である。

本研究では、ワイヤカット放電加工機の加工精度の向上をテーマにして、セカンドカット加工法における加工特性

1．加工送り速度やオフセット量、切り込み量の変化に対する面粗さの変化

2．加工送り速度と切り込み量を変化させたときの除去厚さの変化

について研究を進めたものである。

2.2　実験機器及び加工条件

2.2.1　実験機器

(1)ワイヤカット放電加工機　　三菱電機製　DIAX　SX10

図 2.2　ワイヤカット放電加工機の外観写真

(2)ワイヤ電極　　沖電線製　OB-20P　Φ0.2mm　黄銅ワイヤ

(3)加工材料　　SKD-11　板厚 10、20、30mm

(4) 測定顕微鏡　　MITUTOYO 製　TF-510F

図 2.3　顕微鏡の外観写真

この測定顕微鏡は倍率 30～500 倍まで測定できるほかに、測定機能を持っており、クロスゲージを利用して X 軸、Y 軸ともに最小 1μm までの計測を行うことが可能である。また、機械上部にマイクロ・ネット社の NypixW マルチシステムを介在させることにより、NIKON coolpix950 を装着してデジタルカメラで画像を記録することが可能である。同機の主な仕様は表 2.1 に示す。

表 2.1 測定顕微鏡の主要な仕様

形式	支柱直立型
接眼鏡筒	30°
対物レンズ倍率	×3、×10、×50
接眼レンズ倍率	×10
透過照明装置	反射照明装置
測定最小寸法	1μm
接続用アタッチメント	マイクロ･ネット社製 NypiXW マルチシステム 00201
記録用デジタルカメラ	NIKON COOLPIX 950

(6)表面粗さ測定器　　㈱東京精密製　ハンディサーフ　E-35A

図 2.4 表面粗さ測定器の外観写真

今回用いた表面粗さ測定器は図 2.4 の㈱東京精密製のものを使用した。これはハンディータイプであるため、計測箇所まで同機を持ち運び、測定することが可能である。また、測定データをパソコンに取り込む機能もあり、Excel のマクロを通じてデータを表示、解析することが可能となっている。主な仕様は表 2.2 に示す。

表 2.2 表面粗さ測定器の主要な仕様

測定範囲	X 軸:12.5mm　Y 軸:±160μm
変換機	差動インダクタンス方式
触針先端	ダイヤモンド 90o 円錐 5μmR
測定力	4mN (0.4kgf)以下
パラメータ	(JiS)Ra Rq Ry Rz Rt Sm Pc tp Rpk

(7)精密インジケータ　　MITUTOYO 製

図 2.5　精密インジケータの外観写真

この精密インジケータはファーストカット後の加工面の凸部が正確に加工されているかどうかの測定とセカンドカット後の凸部の除去量を測定するために使用した。主要の仕様は表 2.3 に示す。

表 2.3　精密インジケータの主要な仕様

目量	2μm
測定範囲	0.6mm
広範囲行き精度	3.9μm
隣接誤差	1.2μm
戻り誤差	1.7μm

2.2.2　加工条件表

加工条件　ノッチはワイヤカット放電加工機自体の設定値であるが、本論文中の電気条件として、E パック No で表記することにする。

表 2.4　板厚 10mmの場合の First、Second、Third、Fourth Cut 加工の加工条件表

ワークの板厚 (mm)	10			
加工段階	First Cut	Second Cut	Third Cut	Fourth Cut
E パック番号	379	1065	1066	1067
V0 (ノッチ) 電圧切換え	12	4	4	5
IP (ノッチ) 加工セッテイング	7	4	2	1
OFF (ノッチ) 休止時間	1	1	14	3
SA (ノッチ) 安定回路 A	3	2	2	2
SB (ノッチ) 安定回路 B	10	16	3	16
WS (ノッチ) ワイヤ速度	12	10	10	10
WT (ノッチ) ワイヤ張力	8	10	10	10
PT (ノッチ) プリテンション	14	14	14	14
LQ (ノッチ) 加工液流量	2	1	1	1
LR (ノッチ) 加工液比抵抗	9	9	9	9
VG (ノッチ) 平均加工電圧	43 (41～45)	52 (47～57)	35 (30～40)	52 (47～57)
SC (ノッチ) 安定回路 C	1	1	1	1
FS (ノッチ) FS 電源	1	1	1	1
AE (ノッチ) 電源モード	21	11	11	11
SE (ノッチ) 安定回路 E	1	1	1	1
面粗さ (μmRmax) 加工面粗さ	16～18	12～14	3～5	1.5～2.0

表 2.5　板厚 20、30 ㎜の場合の First、Second Cut 加工の加工条件表

ワークの板厚 (mm)	20		30	
加工段階	First Cut	Second Cut	First Cut	Second Cut
E パック番号	385	1065	391	1065
V0 (ノッチ) 電圧切換え	12	4	12	4
IP (ノッチ) 加工セッテイング	8	4	7	4
OFF (ノッチ) 休止時間	1	1	1	1
SA (ノッチ) 安定回路 A	3	2	3	2
SB (ノッチ) 安定回路 B	10	16	12	16
WS (ノッチ) ワイヤ速度	12	10	12	10
WT (ノッチ) ワイヤ張力	8	10	8	10
PT (ノッチ) プリテンション	14	14	14	14
LQ (ノッチ) 加工液流量	2	1	2	1
LR (ノッチ) 加工液比抵抗	9	9	9	9
VG (ノッチ) 平均加工電圧	43 (41～45)	52 (47～57)	41 (37～41)	52 (47～57)
SC (ノッチ) 安定回路 C	1	1	1	1
FS (ノッチ) FS 電源	1	1	1	1
AE (ノッチ) 電源モード	21	11	21	11
SE (ノッチ) 安定回路 E	1	1	1	1
面粗さ (μmRmax) 加工面粗さ	17～19	12～14	17～19	12～14

2.3　セカンドカット加工における加工面粗さ

(1)　実験目的

セカンドカット加工法は数段階(2nd、3rd、4th Cut)に加工が行われているが、本調査実験ではセカンドカットに重点をおき、加工送り速度を変化させた時、表面の面粗さがどのように変化しているかどうかを調査する。また比較として Third Cut、Fourth Cut の加工も行った。

(2)　実験方法

まず、ワーク材料として SKD-11 板厚 10mm のものを使用し、まずワイヤ放電加工機(図 2.2 参照)により First Cut 加工で図 2.6 に示すように、凸部（形状は図 2.7 参照）が幅 5mm、高さ 3mm の加工を行う。加工条件としては E379（表 2.4 参照）、オフセット値　164μm、最適送りで加工を行った。

図 2.6　SKD-11 の凸凹加工の外観写真

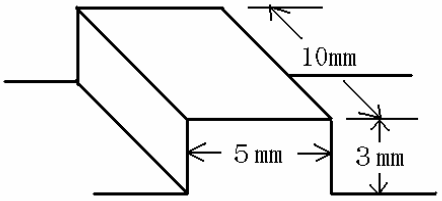


図 2.7　凸部の拡大図

次に First Cut 加工を行った後、凸部の上面だけを Second Cut 加工で直線加工を行った.加工条件としては電気条件、E1065（表 2.4 参照）、オフセット値　104μm、加工送り速度は 2~20mm/min で 2mm/min 刻みの定速で加工し、個々の凸部ごとに加工送り速度を変化させる。Third　Cut、Fourth　Cut 加工においても比較するため、メーカー取扱説明書に書いてある短絡を起こさせない範囲の条件で加工送り速度を変化させて加工を行う。Third　Cut 加工の加工条件としては、電気条件　E1066（表 2.4 参照）、オフセット値　First Cut=179μm、Second Cut=119μm、Third Cut=104μm とし、Fourth Cut 加工の加工条件としては、電気条件 E1067（表 2.4 参照）、オフセット値　first Cut=177μm、Second Cut=122μm、Third Cut=109μm、Fourth Cut=104μm）で加工を行った。

加工後の表面の面粗さ測定には、㈱東京精密製　ハンディサーフ　E-35A（図 2.4 参照）を使用し、凸部の加工表面をワイヤが進行した方向に表面面粗さ測定器の触針を走らせて、測定を行った。

さらに、加工後の凸部の表面の面粗さの状態を詳細に観察するために顕微鏡観察も行った。今回使用した測定顕微鏡としては MITUTOYO 製　TF-510（図 2.3 参照）を使用した。

(3)　実験結果

表 2.6　Second Cut の加工面粗さ結果

加工送り速度 [mm/min]	Ra（μm)	Ry(μm)	Rz(μm)	加工送り速度 [mm/min]	Ra（μm)	Ry(μm)	Rz(μm)
F=2	2.50	14.06	11.19	F=4	2.71	13.67	11.61
	2.65	14.06	11.48		2.85	14.45	12.15
	2.65	14.30	11.71		2.92	15.04	12.38
	2.67	14.40	12.17		2.93	15.19	12.61
	2.75	14.61	12.23		2.94	15.48	12.67
	2.75	14.75	12.24		2.99	15.53	12.68
	2.82	14.83	12.36		3.00	16.27	12.97
	2.84	14.98	12.41		3.06	16.31	13.17
	2.86	15.79	12.51		3.07	16.84	13.27
	2.91	15.80	12.83		3.09	16.92	13.83
F=6	2.71	14.39	11.63	F=8	2.74	15.13	12.26
	2.71	14.76	12.07		2.83	15.25	12.58
	2.85	15.39	12.33		2.86	15.80	12.65
	2.87	15.51	12.56		2.86	15.95	12.90
	2.87	15.70	12.58		2.92	16.22	13.00
	2.90	15.70	12.70		2.96	16.31	13.18
	2.98	15.86	12.80		3.04	16.48	13.22
	3.00	15.87	12.81		3.10	16.84	13.31
	3.03	16.42	12.94		3.11	16.99	13.32
	3.04	16.62	13.16		3.30	17.19	13.55
F=10	2.72	14.91	11.90	F=12	2.79	14.13	12.18
	2.74	14.95	11.93		2.94	14.87	12.23
	2.74	14.96	12.23		2.95	14.95	12.57
	2.85	15.08	12.37		2.97	15.84	12.90
	2.86	15.48	12.52		2.97	16.09	12.97
	2.86	15.49	12.73		3.01	16.16	13.13
	2.90	15.85	12.86		3.05	16.18	13.17

	2.97	16.09	13.02		3.09	16.34	13.34
	3.06	16.35	13.36		3.12	16.36	13.41
	3.08	17.67	13.88		3.14	17.60	14.21
F=14	2.88	15.43	12.75	**F=16**	2.51	14.82	11.88
	2.91	15.94	12.79		2.70	14.88	12.20
	2.93	15.95	12.84		2.80	15.22	12.70
	2.97	16.17	12.95		2.94	15.68	13.03
	2.97	16.45	12.99		2.97	16.36	13.40
	3.06	16.58	13.33		3.01	16.57	13.59
	3.08	16.74	13.37		3.09	16.85	13.60
	3.18	16.78	13.44		3.10	17.13	13.77
	3.22	16.99	13.66		3.16	17.15	13.95
	3.27	18.73	13.94		3.18	18.30	13.96
F=18	2.67	14.18	11.76	**F=20**	2.88	14.64	12.75
	2.75	15.66	12.42		2.91	16.08	13.11
	2.93	15.85	12.84		2.96	16.25	13.21
	2.98	15.88	13.07		3.01	16.41	13.44
	3.06	16.28	13.45		3.04	16.75	13.53
	3.17	16.40	13.67		3.11	16.78	13.59
	3.20	16.45	13.76		3.13	17.01	13.78
	3.21	16.46	13.93		3.19	17.40	13.78
	3.26	17.06	13.95		3.26	17.65	13.97
	3.32	17.14	14.34		3.39	18.60	14.95
最適送り	2.81	15.04	12.44				
	2.85	15.06	12.55				
	2.89	15.89	12.67				
	2.93	16.06	12.93				
	2.94	16.13	12.99				
	2.95	16.26	13.08				
	3.03	16.64	13.41				
	3.04	16.67	13.42				
	3.20	16.69	13.69				
	3.37	16.95	14.05				

表 2.7　Third Cut の加工面粗さ結果

加工送り速度 [mm/min]	Ra（μm)	Ry(μm)	Rz(μm)	加工送り速度 [mm/min]	Ra（μm)	Ry(μm)	Rz(μm)
F=2	0.52	3.04	2.83	F=4	0.53	3.18	2.77
	0.54	3.13	2.87		0.54	3.20	2.79
	0.54	3.19	2.92		0.54	3.21	2.81
	0.54	3.27	2.93		0.54	3.22	2.85
	0.54	3.32	2.95		0.54	3.25	2.89
	0.55	3.34	2.99		0.55	3.47	2.99
	0.56	3.42	3.05		0.56	3.52	3.02
	0.56	3.45	3.07		0.56	3.55	3.03
	0.57	3.60	3.09		0.58	3.57	3.14
	0.57	3.63	3.12		0.58	3.84	3.22
F=6	0.54	3.21	2.89	最適送り	0.57	3.39	3.01
	0.55	3.29	2.92		0.57	3.65	3.13
	0.55	3.33	2.94		0.58	3.66	3.17
	0.56	3.34	2.99		0.58	3.70	3.25
	0.57	3.60	3.05		0.59	3.72	3.25
	0.57	3.64	3.12		0.59	3.87	3.26
	0.58	3.64	3.23		0.59	3.87	3.29
	0.58	3.69	3.24		0.59	3.97	3.35
	0.59	3.75	3.29		0.60	3.98	3.39
	0.61	3.76	3.30		0.60	4.02	3.47

表 2.8　Fourth Cut の加工面粗さ結果

加工送り速度 [mm/min]	Ra（μm)	Ry（μm)	Rz（μm)	加工送り速度 [mm/min]	Ra（μm)	Ry（μm)	Rz（μm)
F=2	0.52	3.04	2.83	F=4	0.53	3.18	2.77
	0.54	3.13	2.87		0.54	3.20	2.79
	0.54	3.19	2.92		0.54	3.21	2.81
	0.54	3.27	2.93		0.54	3.22	2.85
	0.54	3.32	2.95		0.54	3.25	2.89
	0.55	3.34	2.99		0.55	3.47	2.99
	0.56	3.42	3.05		0.56	3.52	3.02
	0.56	3.45	3.07		0.56	3.55	3.03
	0.57	3.60	3.09		0.58	3.57	3.14
	0.57	3.63	3.12		0.58	3.84	3.22
F=6	0.54	3.21	2.89	最適送り	0.57	3.39	3.01
	0.55	3.29	2.92		0.57	3.65	3.13
	0.55	3.33	2.94		0.58	3.66	3.17
	0.56	3.34	2.99		0.58	3.70	3.25
	0.57	3.60	3.05		0.59	3.72	3.25
	0.57	3.64	3.12		0.59	3.87	3.26
	0.58	3.64	3.23		0.59	3.87	3.29
	0.58	3.69	3.24		0.59	3.97	3.35
	0.59	3.75	3.29		0.60	3.98	3.39
	0.61	3.76	3.30		0.60	4.02	3.47

(4) 考察

以下の表 2.9、2.10、2.11 は、表 2.6、2.7、2.8 に記されている数値を平均して値を算出したものである。また Ra、Ry、Rz ごとにグラフ化した。（図 2.8、2.9、2.10 に示す）

表 2.9　Second Cut の加工面粗さ平均結果

加工送り速度 [mm/min]	Ra （μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F=2	2.74	14.76	12.11
F=4	2.96	15.57	12.73
F=6	2.90	15.62	12.56
F=8	2.97	16.22	13.00
F=10	2.88	15.68	12.68
F=12	3.00	15.85	13.01
F=14	3.05	16.58	13.21
F=16	2.95	16.30	13.21
F=18	3.06	16.14	13.32
F=20	3.09	16.76	13.61
最適送り(F=22)	3.00	16.14	13.12

表 2.10　Third Cut の加工面粗さ平均結果

加工送り速度 [mm/min]	Ra （μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F=2	0.55	3.34	2.98
F=4	0.55	3.40	2.95
F=6	0.57	3.53	3.10
最適送り(F=8)	0.59	3.78	3.26

表 2.11　Fourth Cut の加工面粗さ平均結果

加工送り速度 [mm/min]	Ra （μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F=2	0.49	3.09	2.76
F=4	0.50	3.18	2.77
最適送り(F=6)	0.51	3.38	2.86

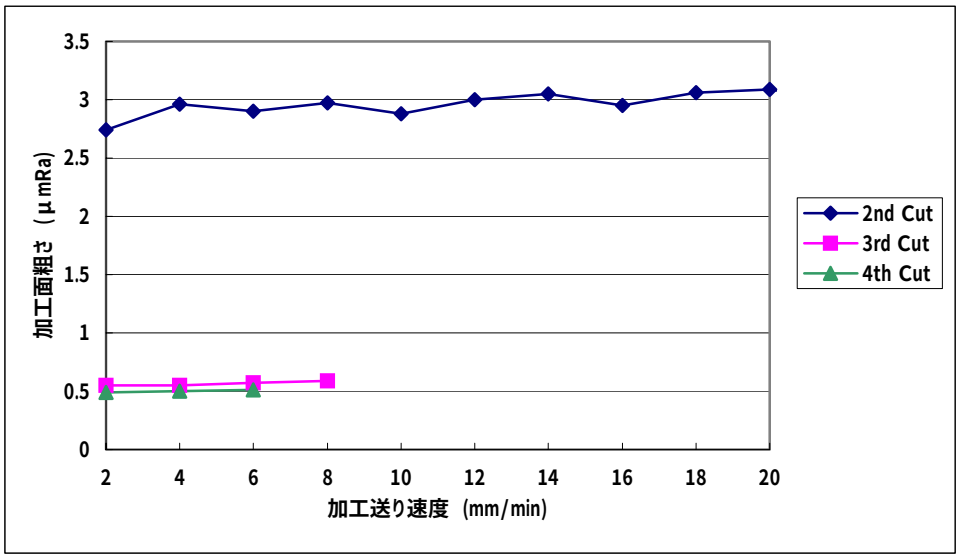


図 2.8　加工送り速度による加工面粗さ(Ra)の変化

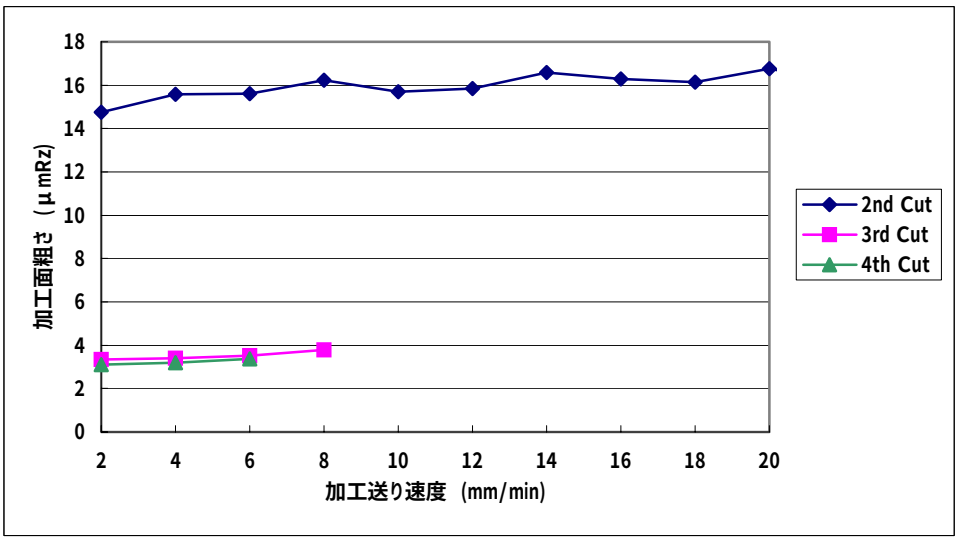


図 2.9　加工送り速度による加工面粗さ(Ry)の変化

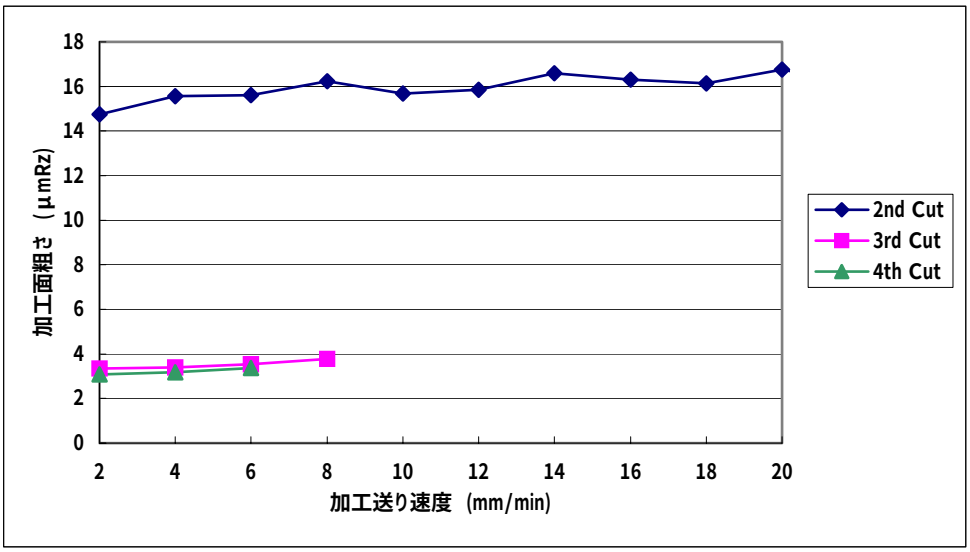


図 2.10　加工送り速度による加工面粗さ(Rz)の変化

放電加工の場合、面粗さに対して、最も大きな影響を持つ因子は、パルスエネルギーを変化させるピーク電流値であり、図 2.8、2.9、2.10 からわかるように、加工面粗さへの影響は非常に大きい。ただし、Third Cut、Fourth　Cut はほとんど差がないのは、ピーク電流値にあまり差がないのは、ピーク電流値にあまり差がないためである。

ピーク電流値を一定にして、加工送り速度に対する加工面粗さは図 2.8、2.9、2.10 のグラフから、わずかではあるが、加工送り速度が上がるに従って、加工面粗さが粗くなる傾向にあり、それぞれ、右肩上がりとなっている。しかしながら、加工送り速度が面粗さに対して、及ぼす影響は非常に小さいという結果が得られた。

理論上、セカンドカット加工法は電気条件が一定の場合、面粗さが変化しないといわれているが、筆者が行った、実験結果からは加工送り速度の上昇に従って、加工面粗さが粗くなる傾向が見られた。その原因としては、測定顕微鏡で加工後のワークの加工表面を観察し、表面を拡大(図 2.11 参照)してみると、細いスジが確認された。そのスジの原因はワイヤの短絡現象が起きているのではないかと考えられる。前述した実験条件、つまり取扱説明書に記載されている短絡しない範囲の加工条件で加工を行ったが、実際には微小な短絡現象が発生し、加工送り速度が速くなるにつれて、その回数が増えていき、それにより、加工面粗さの悪化につながっていったと考えられる。

図 2.11　スジ発生の加工表面

このスジの発生を抑えるにはオフセット量を大きくとり、つまりよせ量を小さくとることで解決できる。

2.4　加工送り速度と切り込み量による加工面粗さ及び除去厚さの関係

2.4.1　加工送り速度と切り込み量による加工面粗さの関係

(1)　実験目的

前述に記載した、セカンドカット加工における加工面粗さ（図 2.8、2.9、2.10 参照）において使われていたオフセット量は、最終仕上がり形状を想定して仕上げ代を除去していくために、よせ量として考えていたが、今回の実験では切り込み量として考えた。つまり目的の切り込み量が正確に除去されているか調査し、加工送り速度とオフセット量（切り込み量）の限界を求めた。また、前述に記載した（図 2.8、2.9、2.10 参照）加工面粗さでは、オフセット量（切り込み量）が一定であったため、加工面粗さがわずかにしか変化しなかったが、オフセット量（切り込み量）と板厚を変化させた場合において、加工面粗さがどのように変化するのか調査を行った。

(2)　実験方法

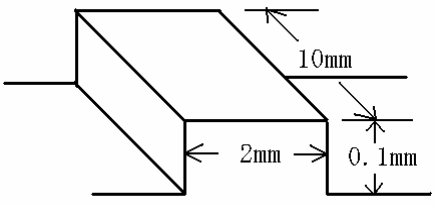


図 2.12　凸部の拡大図

まず、ワーク材料として、板厚が 10、20、30 mmの SKD-11 を用い、First　Cut 加工により加工を行う。加工条件としては、板厚 10mmの場合、電気条件 E379、（表 2.4 参照）オフセット 131μm の最適加工送り速度で行った。板厚 20mm の場合、電気条件 E385（表 2.5 参照）オフセット 115μm の最適加工送り速度で行った。板厚 30mm の場合、電気条件 E391（表 2.5 参照）、オフセット 133μm の最適加工送り速度で加工を行った。形状は図 2.12 に示すように、高さ 0.1mm、幅 2mm、の加工を行い、幅 100mm のワーク間に、20 箇所の凸部を設けた。First　Cut 加工後、精密インジケータ（図　　参照）を用いて、それぞれの凸部が寸法通りに加工されているかを確認し、凸部の上面だけを Second　Cut 加工で直線加工する。加工条件としては、板厚 10mm の場合、電気条件 E1065（表 2.4 参照）、板厚 20mm の場合、電気条件 E1065（表 2.5 参照）、板厚 30mm の場合、電気条件 E1065（表 2.5 参照）それぞれのワークで切り込み量 0~100(μm)変化させ、加工送り速度 2～20（mm/min）変化させ、加工を行った。ワーク一つにつき、切り込み量は一定で、個々の凸部ごと加工送り速度を変化させ、加工を行った。

切り込み量については図 2.13 に示すとおり、ワイヤ１の状態で端面をとり、ゼロ点位置を検出し、そこからワイヤ２の状態になるまでワイヤ移動した距離が切り込み量となり、その位置から、Second　Cut で直線加工を行った。加工後、精密インジケータを用い、加

工された凸部の測定を行い、0.1mm からどれだけ除去されているかを計測する。面粗さの測定については、ワイヤが進行した方向に対して直角方向に測定を行った。

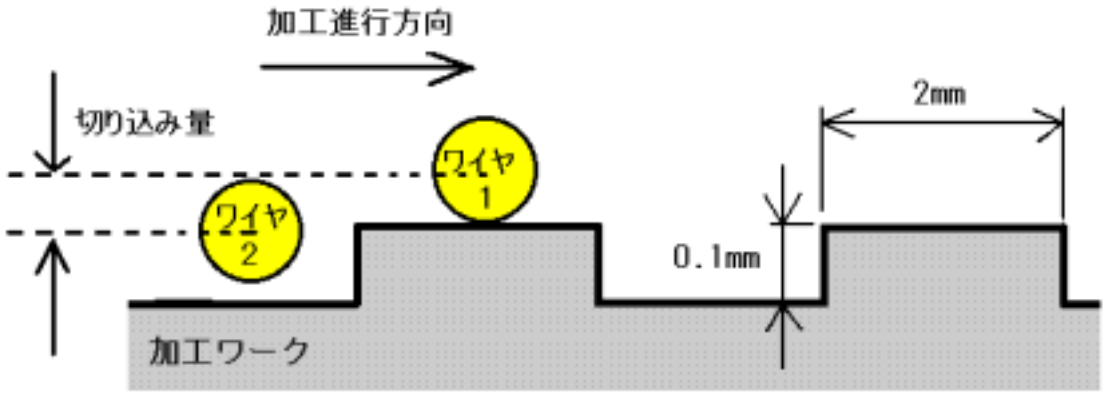


図 2.13　Second　Cut 時の位置決め及び直線加工図

(3)　実験結果

板厚 10、20、30mm でそれぞれのワークで加工条件一定のままで加工送り速度 2～20(mm/min)と切り込み量 0～100μm 変化させ、Second　Cut 加工を行った。加工面粗さを表面面粗さ測定器で測定し、結果を以下に示す

表 2.12　板厚 10mmの時の Second Cut における加工面粗さ

加工送り速度 (mm/min)	切り込み量 (mm)	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)	加工送り速度 (mm/min)	切り込み量 (mm)	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F-2	0	0.92	4.63	3.21	F-4	0	0.92	4.68	3.23
	20	1.61	7.80	5.79		20	1.77	8.55	6.22
	40	1.52	7.38	5.62		40	1.55	7.52	5.38
	60	1.68	8.00	5.58		60	1.64	8.27	5.64
	80	1.53	7.54	5.08		80	1.58	7.71	5.44
	90	1.52	7.55	5.12		90	1.63	7.62	5.62
	100	1.35	6.83	4.92		100	1.55	7.60	5.53
F=6	0	0.99	5.01	3.54	F=8	0	0.94	4.89	3.27
	20	1.74	8.21	6.37		20	1.61	8.08	5.84
	40	1.65	7.81	5.37		40	1.70	8.53	6.00

	60	1.72	8.20	5.98		60	1.65	8.32	5.88
	80	1.58	8.02	5.61		80	1.72	8.30	6.05
	90	1.61	8.10	5.61		90	1.68	8.63	6.26
	100	1.51	7.71	5.28		100	1.62	8.06	5.56
F=10	0	0.98	4.85	3.49	F=12	0	0.96	5.06	3.62
	20	1.67	8.38	5.79		20	1.66	8.27	6.05
	40	1.78	8.78	5.90		40	1.85	8.74	6.19
	60	1.78	9.05	6.16		60	1.68	9.22	6.37
	80	1.68	8.43	5.89		80	1.57	8.65	5.63
	90	1.66	8.25	5.86		90	1.65	8.43	5.77
	100	1.57	8.29	6.00		100	1.68	8.57	6.01
F=14	0	0.93	5.01	3.64	F=16	0	0.94	4.98	3.38
	20	1.54	8.07	5.77		20	1.78	8.37	6.17
	40	1.93	9.28	6.41		40	1.87	9.40	6.38
	60	1.78	9.30	6.38		60	1.85	9.43	6.47
	80	1.82	8.76	6.52		80	1.80	8.77	6.38
	90	1.65	8.38	5.98		90	1.68	8.48	6.26
	100	1.68	8.58	5.88		100	1.70	8.49	6.12
F=18	0	0.90	4.99	3.16	F=20	0	0.92	4.84	3.38
	20	1.69	8.35	5.79		20	1.69	8.26	5.69
	40	1.93	9.41	6.71		40	1.85	9.51	7.27
	60	1.99	9.74	6.94		60	1.89	9.94	7.16
	80	1.82	8.85	6.61		80	1.80	8.62	6.00
	90	1.74	8.57	6.01		90	1.45	7.91	5.22
	100	1.28	6.63	4.65		100	1.47	7.54	5.30

表 2.13　板厚 20mmの時の Second Cut における加工面粗さ

加工送り速度 (mm/min)	切り込み量 (mm)	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)	加工送り速度 (mm/min)	切り込み量 (mm)	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F-2	0	0.93	5.04	3.67	F-4	0	1.08	5.54	3.95
	20	1.40	6.96	4.92		20	1.67	8.12	5.91

	40	1.42	6.99	4.79		40	1.51	7.57	5.07
	60	1.45	7.03	4.87		60	1.60	7.64	5.43
	80	1.50	7.87	5.50		80	1.53	7.97	5.67
	90	1.54	6.86	5.23		90	1.49	7.15	5.21
	100	1.50	7.51	5.14		100	1.54	8.06	5.70
F=6	0	1.10	5.78	3.89	F=8	0	1.09	5.40	3.86
	20	1.63	8.07	5.86		20	1.59	7.66	5.64
	40	1.57	7.64	5.22		40	1.58	7.77	5.68
	60	1.63	7.87	5.60		60	1.70	7.87	5.90
	80	1.73	8.40	5.77		80	1.60	7.90	5.63
	90	1.61	7.93	5.20		90	1.63	7.79	5.68
	100	1.59	8.05	5.61		100	1.70	8.34	5.90
F=10	0	0.96	4.89	3.36	F=12	0	1.16	5.36	4.07
	20	1.53	7.46	5.51		20	1.59	7.63	5.56
	40	14.61	8.27	6.04		40	1.73	8.44	6.29
	60	1.67	8.23	5.67		60	1.70	8.40	5.90
	80	1.53	8.20	5.73		80	1.63	7.67	5.80
	90	1.39	6.79	4.75		90	1.46	7.59	5.26
	100	1.62	8.22	5.83		100	1.43	7.60	5.30
F=14	0	0.99	5.27	3.70	F=16	0	1.06	5.39	4.04
	20	1.50	7.51	5.18		20	1.59	7.95	5.90
	40	1.80	8.48	5.99		40	1.88	9.09	6.62
	60	1.70	8.53	5.90		60	1.76	8.81	6.12
	80	1.37	7.13	4.90		80	1.30	6.60	4.63
	90	1.44	7.07	5.04		90			
	100					100			
F=18	0	1.03	5.22	3.62	F=20	0	0.96	4.86	3.37
	20	1.42	7.07	5.01		20	1.48	6.98	5.13
	40	1.85	9.00	6.48		40	1.82	9.22	6.87
	60	1.69	8.31	6.09		60	1.66	8.09	5.67
	80					80			
	90					90			
	100					100			

表 2.14　板厚 30mmの時の Second Cut における加工面粗さ

加工送り速度 (mm/min)	切り込み量 (mm)	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)	加工送り速度 (mm/min)	切り込み量 (mm)	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)
F-2	0	0.98	5.37	3.50	F-4	0	1.03	5.38	3.76
	20	1.33	6.90	4.65		20	1.49	7.55	5.23
	40	1.63	8.11	5.71		40	1.66	8.34	5.67
	60	1.61	7.69	5.58		60	1.63	8.41	5.80
	80	1.61	8.16	6.00		80	1.62	8.01	5.95
	90	1.84	8.85	6.07		90	1.83	9.03	6.34
	100	1.73	8.74	6.37		100	1.80	8.84	6.43
F=6	0	1.04	5.42	3.83	F=8	0	1.04	5.54	3.67
	20	1.62	8.14	5.46		20	1.62	8.43	5.59
	40	1.68	8.41	5.93		40	1.68	8.87	5.81
	60	1.69	8.72	6.38		60	1.69	9.37	6.74
	80	1.72	8.70	6.08		80	1.72	8.51	5.74
	90	1.80	8.69	6.32		90	1.80	9.28	6.03
	100	1.63	7.86	5.93		100	1.63	8.60	6.00
F=10	0	1.01	5.36	3.63	F=12	0	1.01	5.22	3.54
	20	1.56	8.20	5.62		20	1.56	8.59	5.71
	40	1.65	8.59	6.06		40	1.65	8.57	5.95
	60	1.74	8.63	6.30		60	1.74	9.16	6.31
	80	1.58	7.54	5.18		80	1.58	7.42	5.10
	90	1.80	9.13	6.53		90	1.80	7.71	5.60
	100	1.66	8.40	5.83		100	1.66	8.49	6.36
F=14	0	0.96	5.17	3.37	F=16	0	1.01	5.11	3.51
	20	1.57	7.89	5.74		20	1.62	8.61	5.82
	40	1.71	8.40	6.20		40	1.76	8.98	6.34
	60	1.78	8.37	6.05		60	1.80	8.65	6.00
	80	1.55	7.63	5.32		80	1.56	7.97	5.61
	90	1.48	7.13	4.99		90			
	100					100			

F=18	0	1.01	5.36	3.96	F=20	0	1.01	0.99	3.70
	20	1.61	8.47	5.96		20	1.61	1.65	5.67
	40	1.73	8.63	5.77		40	1.73	1.75	6.24
	60	1.48	7.06	5.05		60	1.48	1.52	5.08
	80					80			
	90					90			
	100					100			

加工送り速度をパラメータとし、切り込み量に対する加工面粗さの変化を表 2.12、2.13、2.14 より、Ra、Ry、Rz ごとにグラフ化し、それぞれの板厚ごとに図 2.14～2.22 に示した。

板厚 10mm の時の加工面粗さ

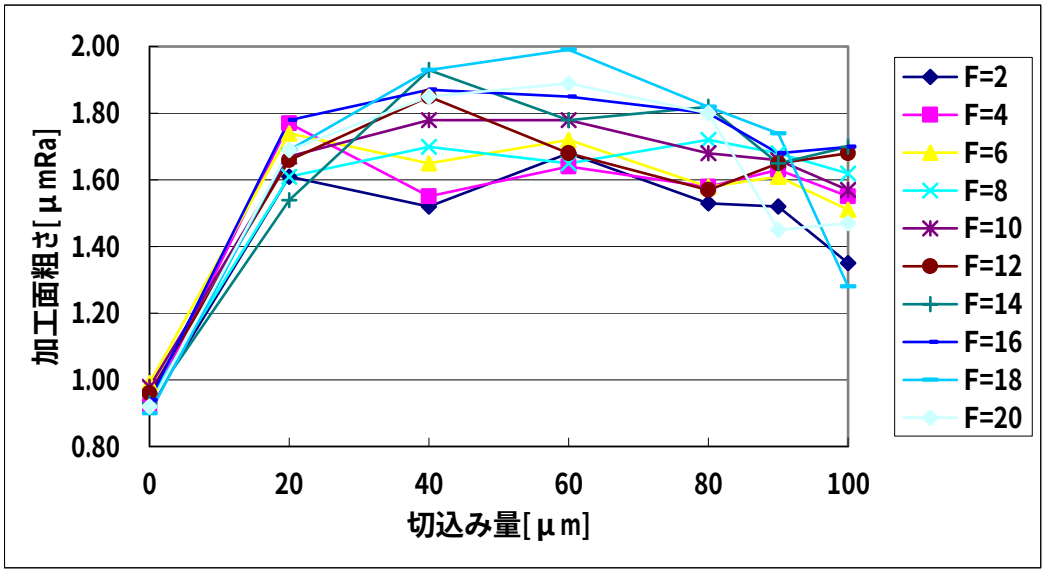


図 2.14　板厚 10mmの時の切り込み量に対する加工面粗さ(Ｒa)の変化

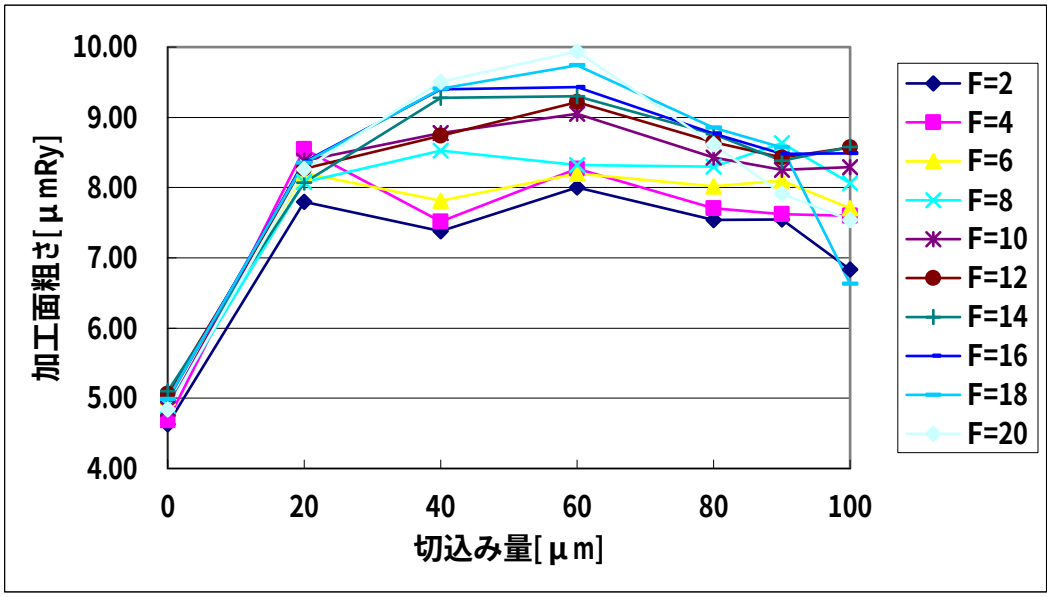


図 2.15　板厚 10mmの時の切り込み量に対する加工面粗さ(Ry)の変化

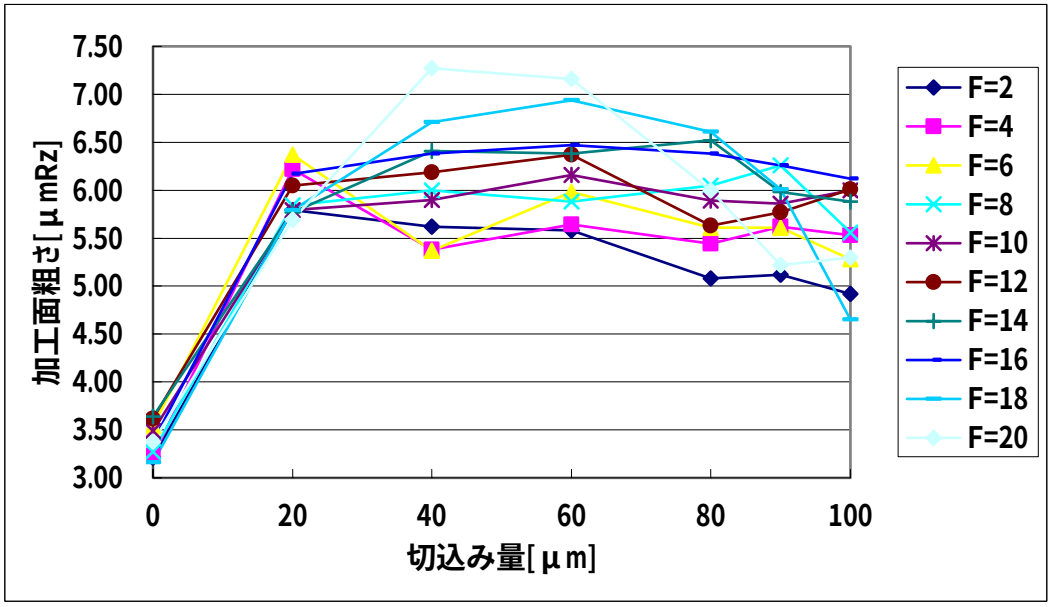


図 2.16　板厚 10mm の時の切り込み量に対する加工面粗さ(Rz)の変化

板厚 20mm の時の加工面粗さ

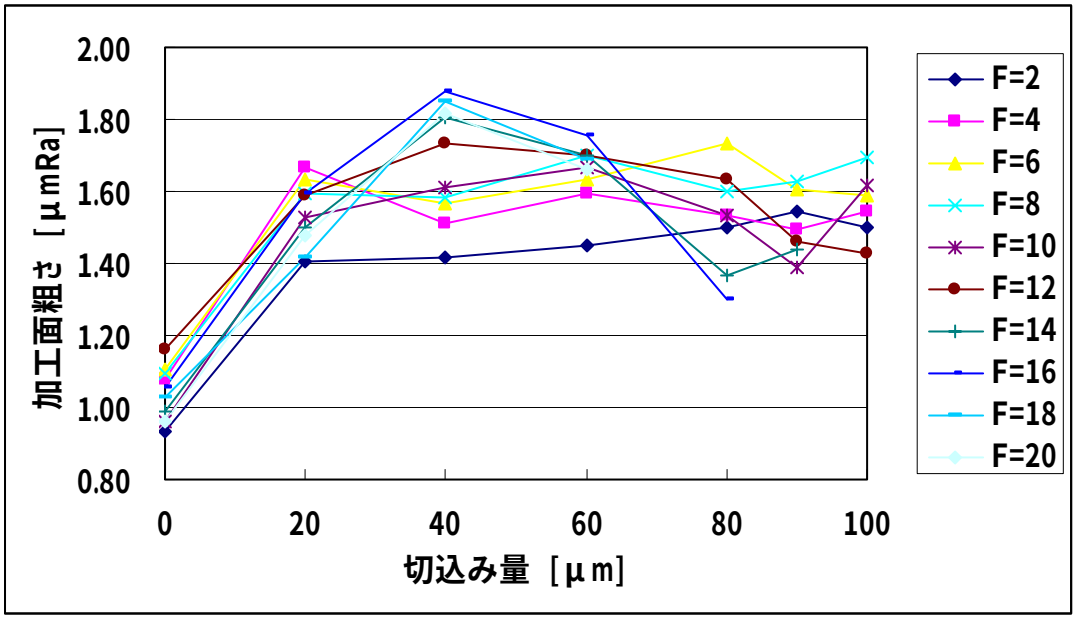


図 2.17　板厚 20mm の時の切り込み量に対する加工面粗さ(Ra)の変化

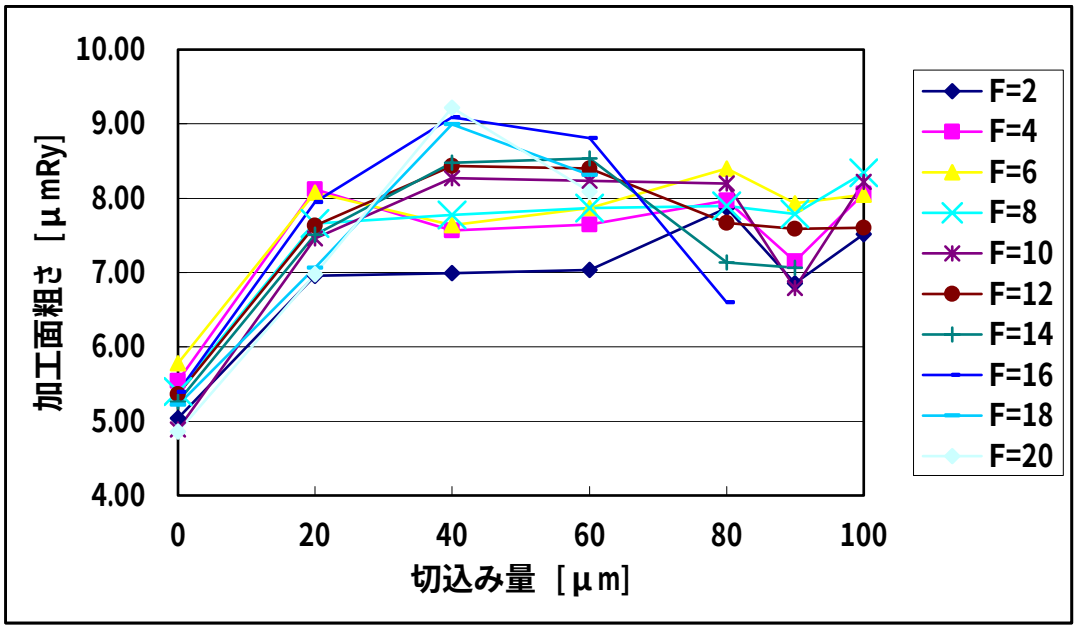


図 2.18　板厚 20mm の時の切り込み量に対する加工面粗さ(Ry)の変化

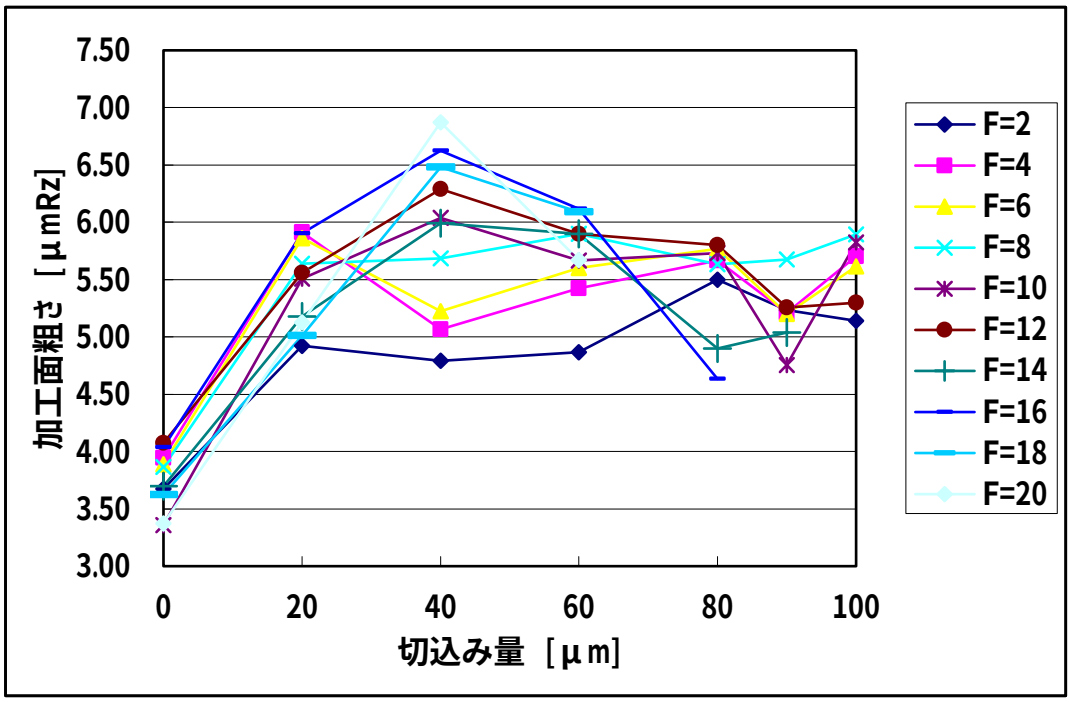


図 2.19　板厚 20mmの時の切り込み量に対する加工面粗さ(Rz)の変化

板厚 30mmの時の加工面粗さ

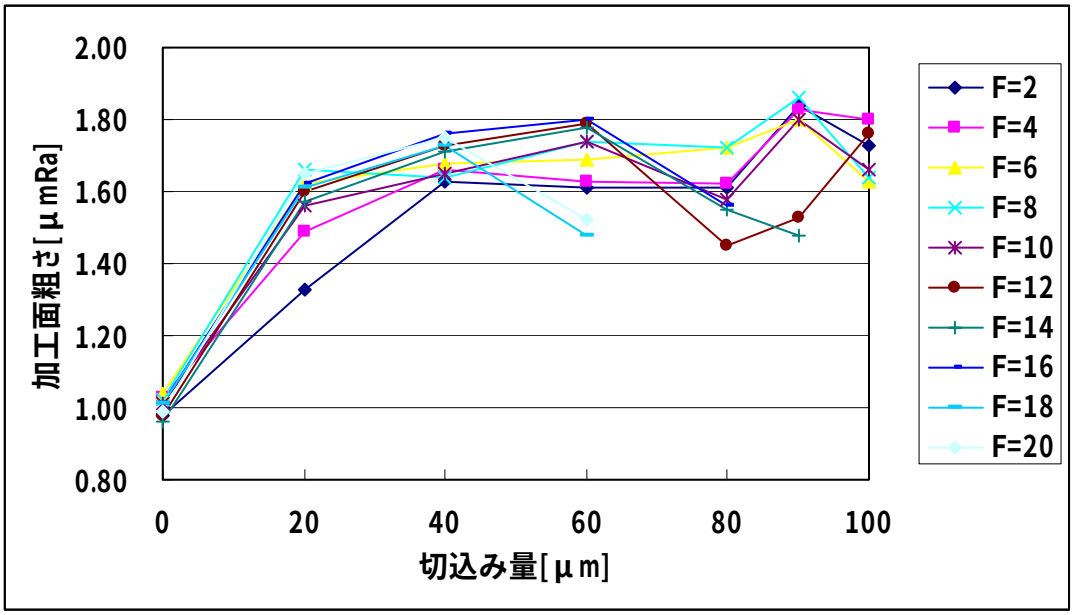


図 2.20　板厚 30mm の時の切り込み量による加工面粗さ(Ra)の変化

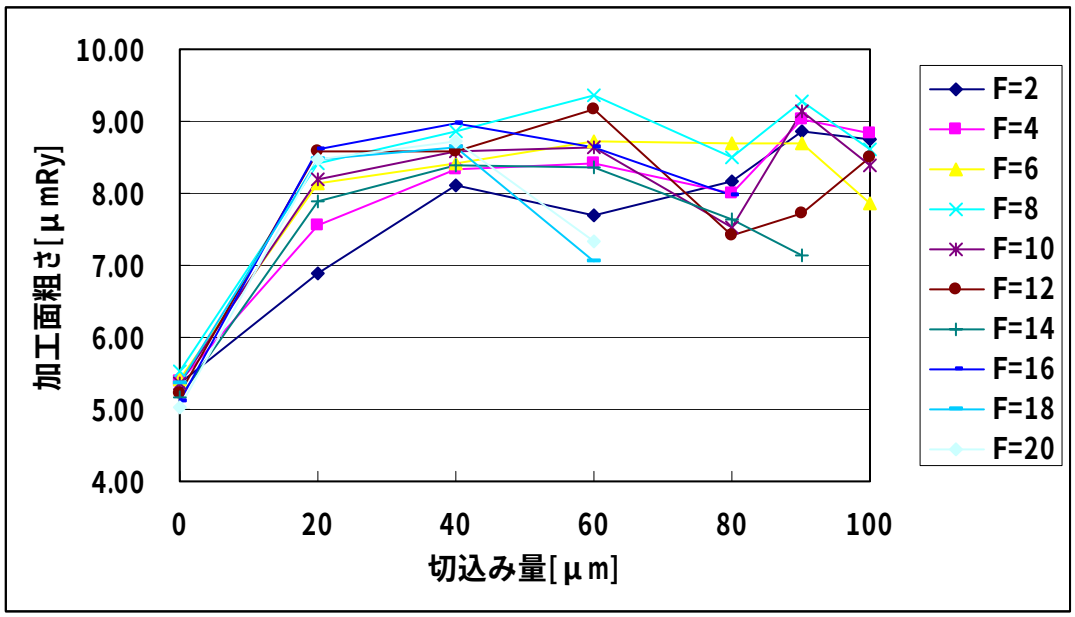


図 2.21　板厚 30mmの時の切り込み量に対する加工面粗さ(Ry)の変化

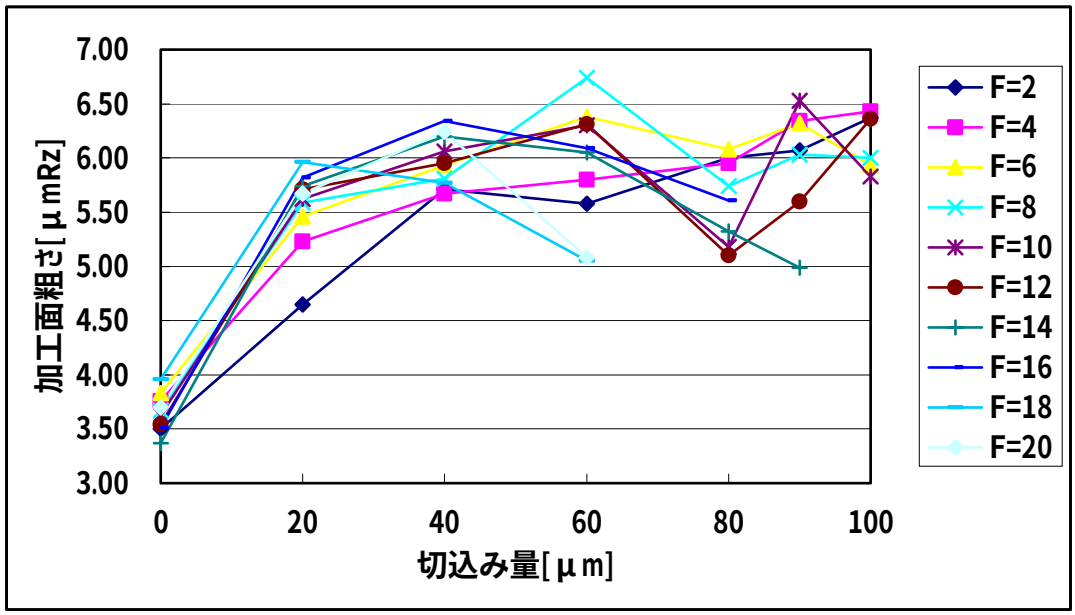


図 2.22 板厚 30mm の時の切り込み量に対する加工面粗さ(Rz)の変化

(5)　考察

図 2.14～2.22 は横軸に切り込み量(μm)、縦軸に加工面粗さ(μm)をとり、加工送り速度(mm/min)ごとに、グラフ化したものである。

切り込み量、加工送り速度を大きくしていくと、短絡現象が発生していた。図 2.23 と図 2.24 は板厚 20mm、切り込み量 69μm、で加工送り速度がそれぞれ 16(mm/min)と 18(mm/min)の場合において示した顕微鏡写真である。

図 2.23　セカンドカット後の顕微鏡写真
板厚 20mm、切り込み量 60μm、
加工送り速度 16mm/min

図 2.24　セカンドカット後の顕微鏡写真
板厚 20mm、切り込み量 60μm、
加工送り速度 16mm/min

短絡現象による加工面粗さの悪化の要因としてワークの加工面においてなんらかの原因があるのではないかと考え、顕微鏡を用いて、面粗さの観察をして見ると以下のような加工面が見られた。

図 2.23 の顕微鏡写真は切り込み量 60μm、加工送り速度 16mm/min、でセカンドカット加工を行った加工面を撮影したものである。そして、図 2.24 の顕微鏡写真は切り込み量 60μm、加工送り速度 18mm/min でセカンドカット加工を行った加工面を撮影したものである。図 2.23 の加工面はきれいに加工されており、まったく問題のない加工面であるといえるが、図 2.24 の加工面は縦にスジが入っていることが顕微鏡写真をみれば分かる。これは加工送り速度は速くして加工を行ったため、短時間の短絡現象を起こし、加工面に縦のスジが発生してしまったものと考えられる。この後の実験において、仮に加工できたものでも図 2.24 に示すようにスジが発生した場合は、加工できてないと判断し、除外することとした。

2.4.2　加工送り速度と切り込み量による除去厚さの関係

切り込み量に対し加工送り速度を変化させたときの除去厚さの結果を表 2.15～2.17 に表した。

表 2.15　板厚 10mm の時、加工送り速度と切り込み量に対する除去厚さの変化表

		加工送り速度　(mm/min)									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
切り込み量（μm）	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	20	24	24	24	24	24	22	22	22	20	20
	40	44	44	42	38	36	36	32	32	30	30
	60	64	60	60	56	52	48	46	44	44	42
	80	82	82	76	72	70	70	68			
	90	90	82	82	78	76	74	72			
	100	100	94	88	82	80	74				

表 2.16　板厚 20mm の時、加工送り速度と切り込み量に対する除去厚さの変化表

		加工送り速度　(mm/min)									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
切り込み量（μm）	0	6	6	4	4	4	4	4	4	2	2
	20	20	18	18	18	18	18	18	16	16	14
	40	42	40	30	26	26	24	20	18	18	16
	60	58	52	46	44	44	44	40	34		
	80	72	66	58	52						
	90	90	82	74							
	100	100	90	80							

表 2.17　板厚 30mm時の加工送り速度と切り込み量に対する除去厚さ結果

		加工送り速度　(mm/min)									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
切り込み量（μm）	0	12	10	10	10	8	8	8	8	8	6
	20	24	22	18	16	16	16	14	14	14	12
	40	44	44	40	36	30	28	28			
	60	60	50	44	40	32	32				
	80	72	62	50	42						
	90	72	64	52	46						
	100	92	76								

表 2.15～2.17 を加工送り速度をパラメータとし、各板厚における切り込み量に対する除去厚さの変化を図 2.25～2.27 に示す。

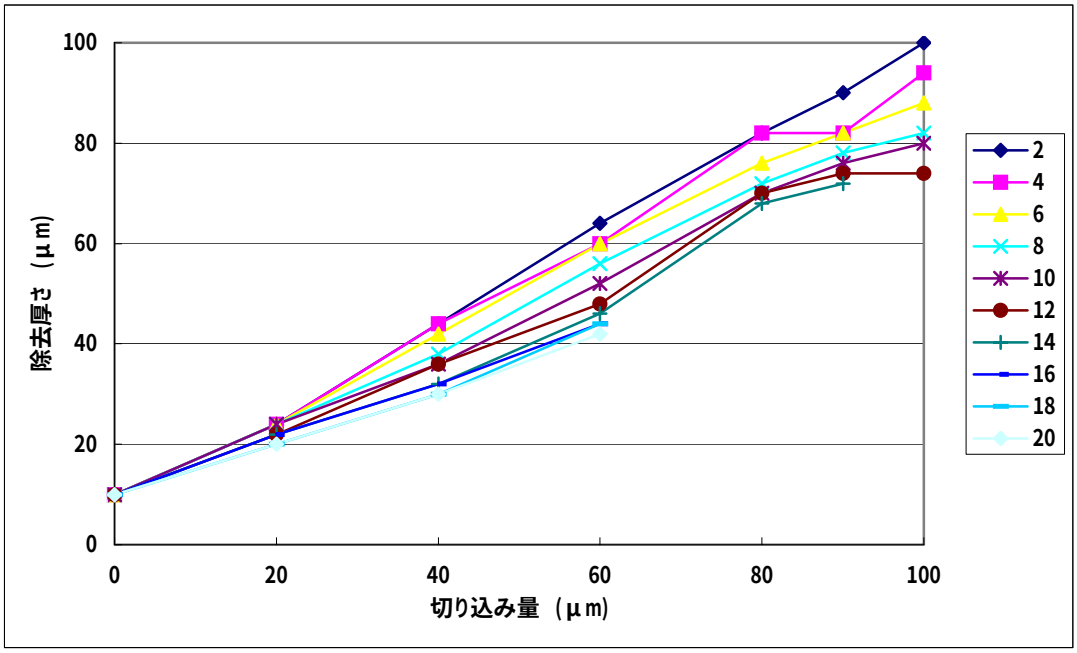


図 2.25　板厚 10mm 時の切り込み量に対する除去厚さの変化

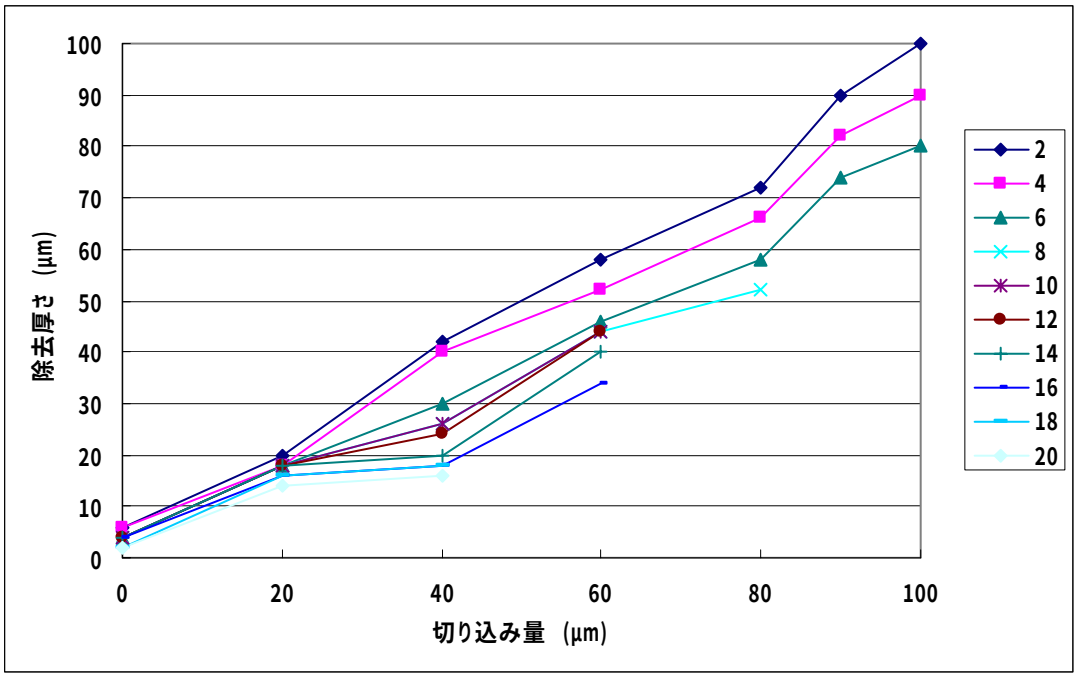


図 2.26　板厚 20mm 時の切り込み量に対する除去厚さの変化

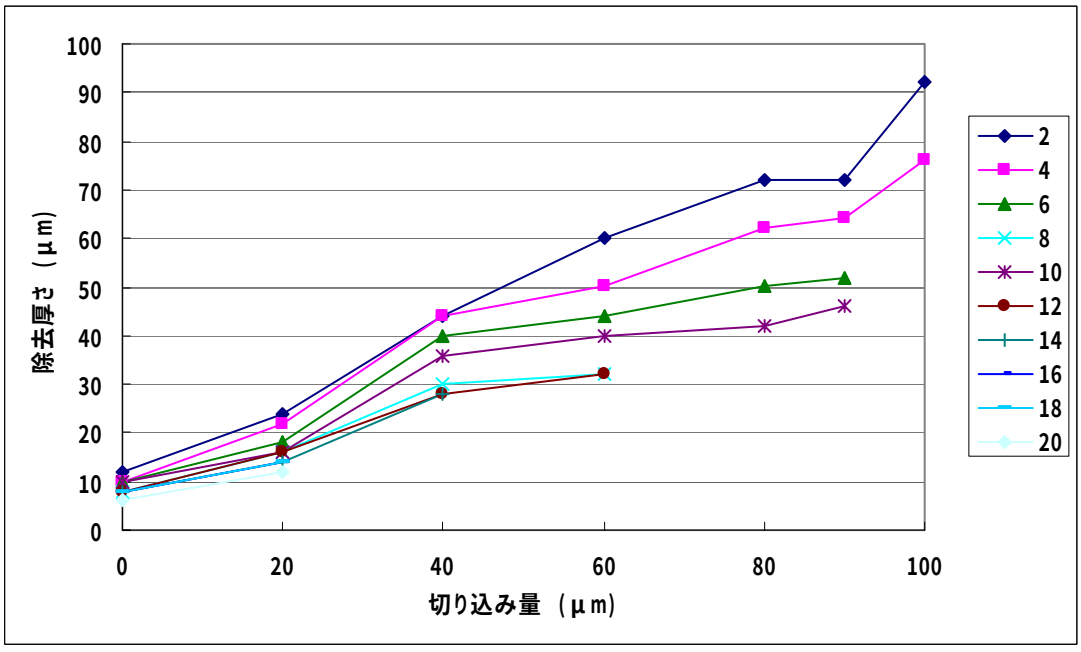


図 2.27　板厚 30mm 時の切り込み量に対する除去厚さの変化

図 2.25～2.27 は加工送り速度をパラメータとし、横軸に切り込み量(μm)、縦軸に除去厚さ(μm)をとり、グラフ化したものである。各図にとも全体的に切り込み量が増えるにつれて、除去厚さも大きくなっている傾向が見られる

次に見方を変えて、切り込み量をパラメータとし、各板厚における加工送り速度に対する除去厚さの変化についてグラフ化した。(図 2.28～2.30 に示す)

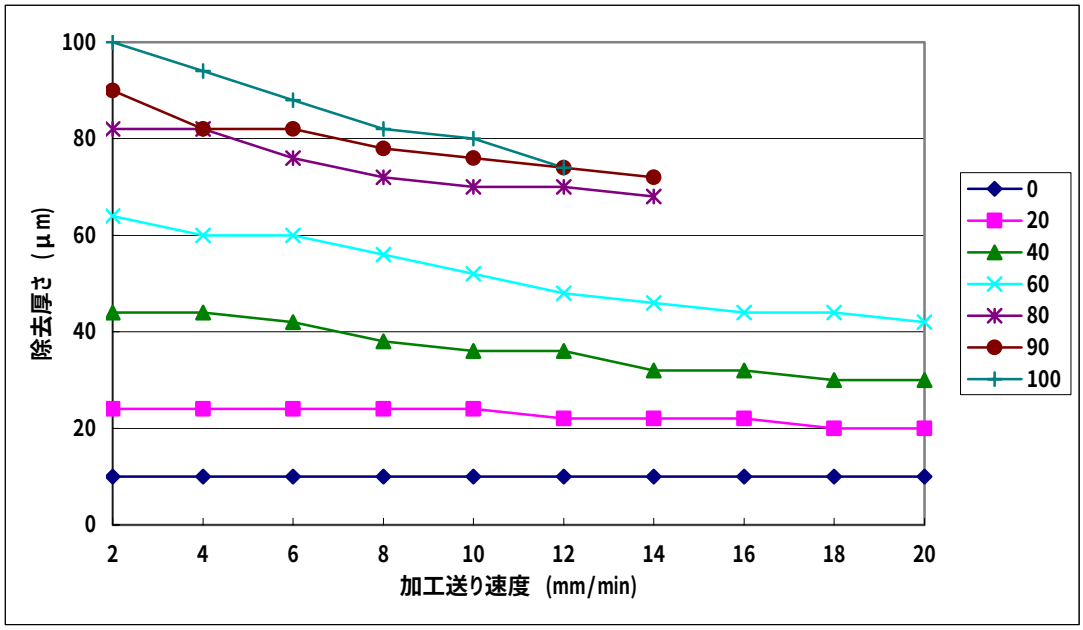


図 2.28　板厚 10mm 時の加工送り速度に対する除去厚さ

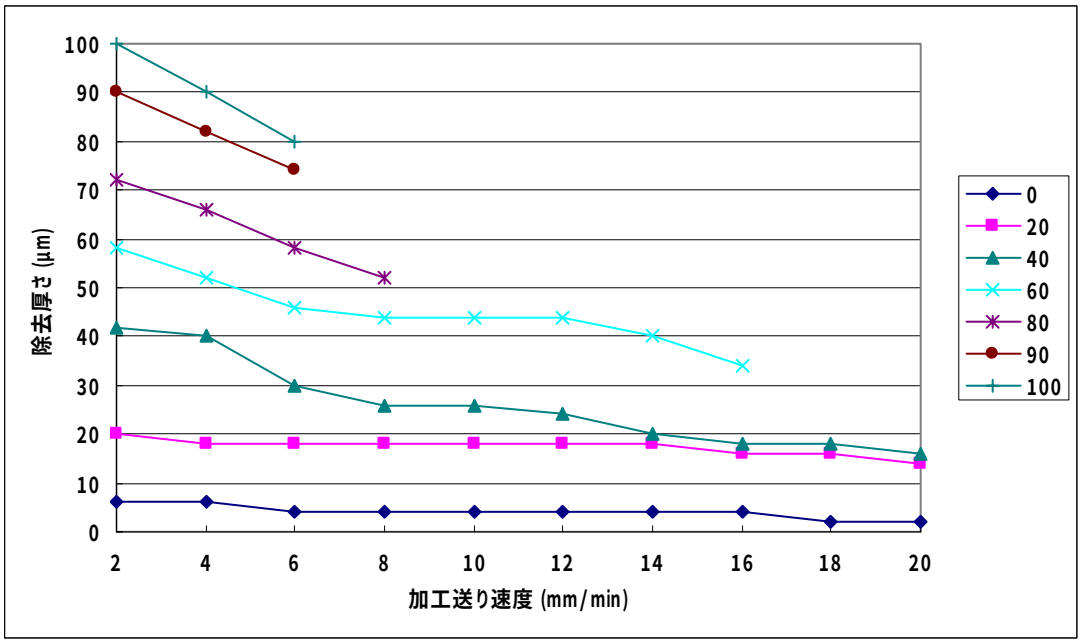


図 2.29　板厚 20mm 時の加工送り速度に対する除去厚さ

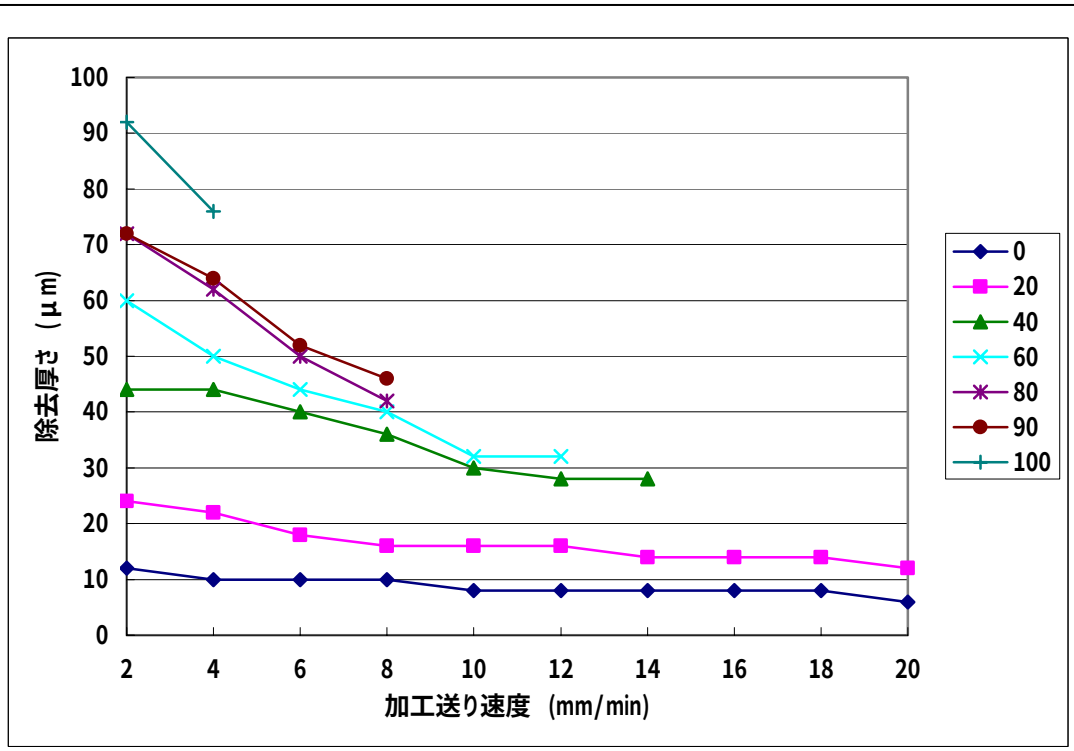


図 2.30　板厚 30mm 時の加工送り速度に対する除去厚さ

図 2.28～2.30 は切り込み量をパラメータとし、横軸に加工送り速度(mm/min)、縦軸に除去厚さをとり、グラフ化したものである。同じ切り込み量において加工送り速度が上がるにつれて除去厚さが少なくなっていっていることがわかる。また切り込み量が 60μm 以上の加工においては短絡現象が起こり、加工不可能になるところが現れた。また全体的に加工送り速度を上げていくと、除去厚さは減少傾向が見られることが図 2.28～2.30 を見て分かる。

以上の結果より、除去厚さは加工送り速度を上げていくと、指定した目的の切り込み量より少なく加工され、つまり、取り残す部分が多くなることがこの実験により明らかになった。また板厚を大きく、切り込み量を多くした場合、除去厚さの変化は大きくなる傾向がみられるが、切り込み量が少ない場合、どの板厚でも加工送り速度の変化が及ぼす除去厚さの変化は非常に小さいことが分かる。そのことにより、加工効率を考えた場合、除去厚さは少なくなるが、どの板厚においても切り込み量を少なくし、加工送り速度を上げたほうが良いと考えられる。

2.5　セカンドカット加工における加工限界の選定及び最適除去厚さ式の検討

2.5.1　セカンドカット加工における加工限界の選定

図 2.25～2.30 では板厚の変化に伴う加工送り速度と切り込み量による除去厚さの関係を示したが、以下の図 2.31～2.33 は切り込み量をパラメータとし、各板厚における加工送り速度による単位時間あたりの除去量の関係を見た。

単位時間あたりの除去量で見てみると、ワイヤがどのぐらいの除去量に達すれば、短絡現象が起こるのかわかるのと同時に、セカンドカット加工におけるワイヤ放電加工の加工限界が見えてくるのではないかと思われる。

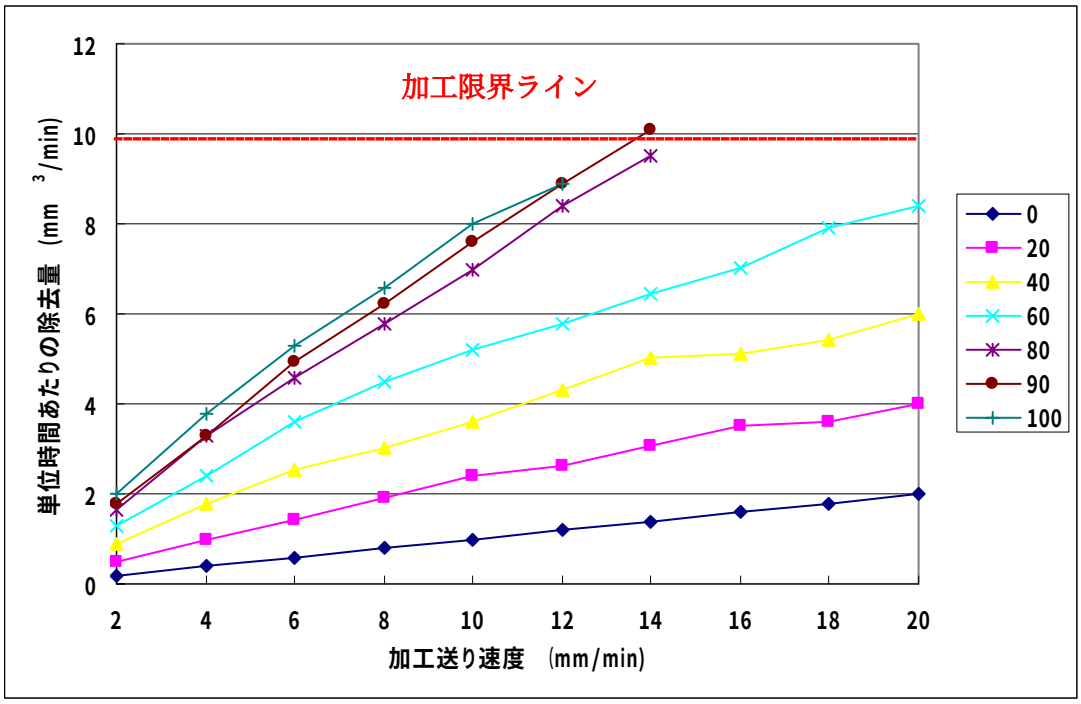


図 2.31　板厚 10mm 時の加工送り速度に対する単位時間あたりの除去量の関係

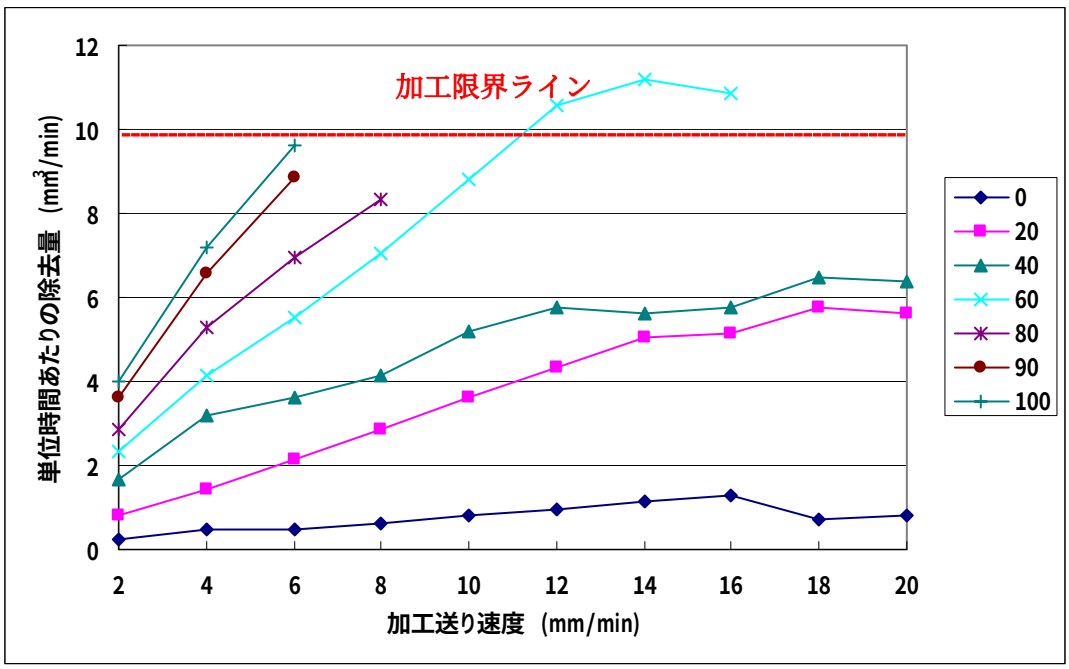


図 2.32　板厚 20mm の時の加工送り速度に対する単位時間あたりの除去量の関係

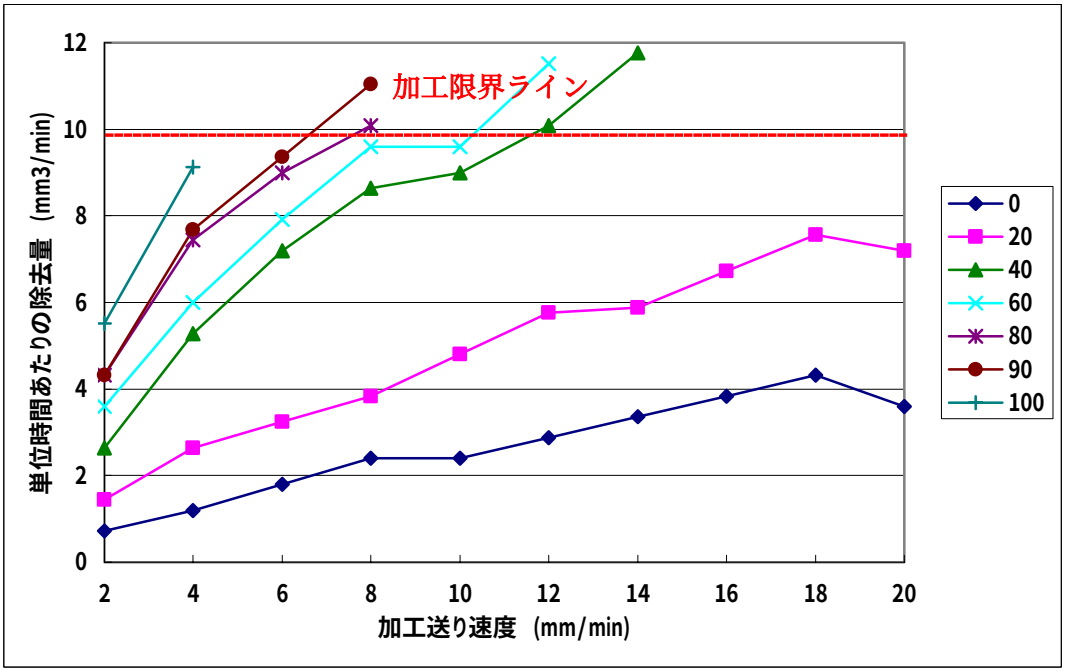


図 2.33　板厚 30mm の時の加工送り速度に対する単位時間あたりの除去量の関係

図 2.25～2.30 は加工送り速度と切り込み量に対する除去厚さで示した図であったが、図 2.31～2.33 では切り込み量をパラメータとし、横軸に加工送り速度、縦軸に単位時間あたりの除去量で表した。

図 2.31 から板厚 10mm の場合、単位時間あたりの除去量 10(mm^3/min)の辺りで加工送り速度と切り込み量に対する加工限界が見えてきた。また切り込み量 0～60(μm)の間ではまだ加工限界が見えていないが、単位時間あたりの除去量 10(mm^3/min)の辺りで収まるのではないかと考えられる。

図 2.32 から板厚 20mm の場合、単位時間あたりの除去量が 10(mm^3/min)の辺りで加工送り速度と切り込み量に対する加工限界が見えてきた。また切り込み量 0～40(μm)の間ではまだ加工限界が見えていないが、単位時間あたりの除去量 10(mm^3/min)の辺りで収まるのではないかと考えられる。

図 2.33 から板厚 30mm の場合、単位時間あたりの除去量が 10(mm^3/min)の辺りで加工送り速度と切り込み量に対する加工限界が見えてきた。また切り込み量 0～20(μm)の間ではまだ加工限界が見えていないが、単位時間あたりの除去量 10(mm^3/min)の辺りで収まるのではないかと考えられる。

以上の結果により、各板厚における、加工送り速度に対する単位時間あたりの除去量の限界をみることができた。また板厚 10、20、30mm の単位時間あたりの除去量 10(mm^3/min)の辺りで加工限界となっている。板厚を変化した場合おいて、単位時間あたりの除去がほぼ一定であることが今回の実験で見られた。したがって、セカンドカット加工における加工特性を知ることができるのではないかと考えられる。よってこの結果と予測をもとに、加工送り速度と切り込み量の関係式を検討してみることにした。

2.5.2　加工送り速度と切り込み量における最適除去厚さの関係式

前節の結果をもとに、加工送り速度と切り込み量における最適除去厚さの関係式を検討する。

加工送り速度 $F(mm/\min)$、除去厚さ $\delta(mm)$、板厚を $t(mm)$、最大除去厚さを $W\max(mm^3/\min)$ とおくと以下の式が成り立つ。

$$W\max \approx F \cdot \delta \cdot t \quad \cdots ①$$

ここで安定加工における $W\max$ を図 2.31～2.33 から求められる加工限界値の 80%が妥当と考え、①の式に代入した。今回は 10、20、30mm の場合において最適除去厚さの式を求めることにした。

板厚 10mm の時の最適除去厚さの式、板厚 $t=10(mm)$　加工限界値 $W\max=10\left(mm^3/\min\right)$ とおくと、以下の式が成り立つ。

$$F \cdot \delta \approx \frac{10\times 0.8}{10} = 0.8 \quad \cdots ②$$

したがって②の式から板厚 10mm の場合における最適除去厚さの式は以下に示す。

$$F = \frac{0.8}{\delta} \quad \cdots ③$$

となり、③の式を用いることにより、切り込み量を設定することにより、最適加工送り速度を決定することが可能となった。

同様に板厚 20mm の場合において、板厚 $t=20(mm)$、加工限界値 $W\max=10(mm^3/\min)$ を代入すると、

$$F \cdot \delta \approx \frac{10\times 0.8}{20} = 0.4 \cdots ④$$

となり、したがって板厚 20mm の場合での最適除去厚さの式は以下の通りになる。

$$F = \frac{0.4}{\delta} \cdots ⑤$$

同様に板厚 30mm の場合において、板厚 $t = 20(mm)$ 、加工限界値 $W\max = 10(mm^3/\min)$ を代入すると、

$$F \cdot \delta \approx \frac{10 \times 0.8}{30} = 0.27 \cdots ⑥$$

となり、したがって板厚 20mm の場合での最適除去厚さの式は以下の通りになる。

$$F = \frac{0.27}{\delta} \cdots ⑦$$

となり、⑦の式を用いることにより、板厚 20mm の場合においても切り込み量を設定することによって、最適加工送り速度を求めることが可能となった。

以上の結果により、求められた③、⑤、⑦の式を用いることにより、目的の切り込み量を設定することによって、最適加工送り速度を求めることが可能となった。よってセカンドカット加工においての加工特性が見出せた。

また今回、どの板厚においても、10 (mm^3/min)の辺りで、加工限界ラインが現れていることから、以下の式が成り立つと仮定できる。

$$F = \frac{10 \times 0.8}{\delta \cdot t} \cdots ⑧$$

よって⑧の式により、板厚 t(mm)と切り込み量δ(mm)を設定することにより、最適加工送り速度 F(mm/min)を求めることが可能となった。

以上の結果により、板厚を変化させても単位時間あたりの除去量はほぼ同じ値が得られ、⑧の式を導くことができたことが今回の研究の成果である。今後の課題として、被加工物、加工条件の変化にも対応し、セカンドカット加工の最適式を検討する必要があり、研究の幅を Third、Fourth Cut に広めた場合、仕上げ加工全体の時間短縮に大いに期待できるのではないかと考えられる。

2.6 結言

ワイヤカット放電加工機での加工には、荒加工で終わる First Cut と、仕上げ加工段階(Second、Third、Fourth Cut)まで行うセカンドカット加工がある。セカンドカット加工は仕上げ面粗さや形状、寸法精度などに効果を持ち、ワイヤカット放電加工機の仕上げ加工として広く普及している。

筆者は、ワイヤ放電加工機の加工精度向上をテーマに、セカンドカット加工における加工特性について研究を進めてきた。その中でも Second Cut を重点において研究を進め、加工条件と加工精度の関係を導き出し、仕上げ段階の見直しとともに、最適化を目的とし、研究を行った。

セカンドカット加工における面粗さの調査実験では、切り込み量を一定の場合、加工送り速度を変化させても加工面粗さは変化しないと言われているが、わずかに面粗さが粗くなる傾向が見られた。

また切り込み量と加工送り速度を変化させて加工を行った場合では、切り込み量が大きくなるにつれて粗くなる傾向が見られた。加工送り速度の変化に対する加工面粗さは切り込み量を小さくとったほうが加工面粗さは小さくなる結果が得られたが、加工送り速度を上げていっても加工面粗さはほぼ一定の値になることが分かった。よって切り込み量を小さくとり、加工送り速度を上げていくことがセカンドカット加工には適していると考えられる。

今回の実験では、加工送り速度と切り込み量に対する単位時間あたりの除去量の関係式を求めることができた。今回は板厚 10mm、20mm の場合において式を求めた。

$$\text{板厚 10mm の場合} \quad F = \frac{0.8}{\delta}$$

$$\text{板厚 20mm の場合} \quad F = \frac{0.4}{\delta}$$

$$\text{板厚 30mm の場合} \quad F = \frac{0.27}{\delta}$$

上記の式により、切り込み量を設定することによって、最適加工送り速度を求めること可能となった。今回、切り込み量と加工送り速度に対する単位時間あたりの除去量の関係式を求めることができたことが本研究の成果である。

今後の課題として、板厚、被加工物の変化にも対応し、セカンドカット加工の最適式を検討する必要があり、研究の幅を Third、Fourth Cut に広めた場合、仕上げ加工全体の時間短縮に大いに期待できるのではないかと考えられる。

第3章　テーパカット加工の加工精度の向上

3.1　緒言

ワイヤカット放電加工機の応用分野を飛躍的に拡大させたのがこのテーパカット加工の装置である。

従来、ワイヤカット放電加工機は X 軸、Y 軸の 2 軸よりテーブルを駆動し、二次元形状の加工を行うものであった。しかし、プレス抜型はたいていの場合、裏逃げ加工が必要であり、放電加工を行った後、別な機械に載せて加工することが多かったが、テーパカット加工装置が登場してからは、抜型加工と裏逃げ加工が 1 回の工程で行えるようになり、大幅な時間短縮につながった。

近年、テーパカット加工はいろいろな面で使われるようになり、ワイヤカット放電加工機の最大の強みである。超合金などの硬い金属をどんな形でも加工することができることを利用し、今まで、時間と製作コストがかかっていたものを大幅に削減することができるようになった。例えば、ガスタービンエンジンに使用されるタービンブレード(図 3.1)の翼面の加工において、材質は耐熱合金の難切削であり、図 3.1 を見られるように翼厚が非常に薄く、ひねりを伴った形状であるため、非常に切削加工は難しく、熟練を要する。しかし、これがワイヤカット放電加工機のテーパカット加工を利用すれば、切削加工よりは非常に楽に加工を行うことができ、また夜間や休日の無人加工も可能であり、製作コストも大幅に削減をすることが可能となる。

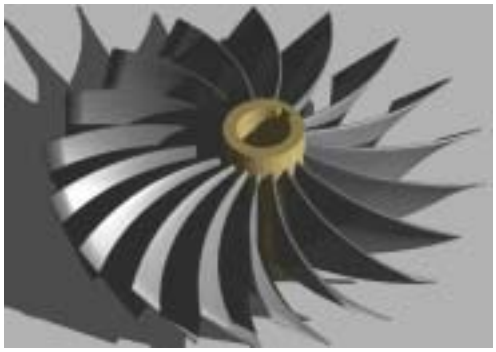


図 3.1　タービンブレード

他にも、パンチとダイの同時加工、抜き勾配面の加工、型彫り放電加工の電極の加工、樹脂サッシ押し出し型のベアリング加工、線引きダイスのテーパ面加工、溶接治具(ガバリ)の加工、総形バイトの刃先、逃げ面加工など、テーパカット加工の用途はじつに様々であり、その価値はとても高いものだと考えている。しかし、テーパカット加工は角度が大きくなるにつれて、角度誤差も大きくなることがわかっており、小型化、軽量化、高精度の加工においては加工精度を出すのが難しいであろうと思われる.

今回の、本論文の内容ではテーパカット加工の加工精度の向上を目的とし、誤差が発生する因子、それに対する改善策について述べた。

3.2　テーパカット加工について

ワイヤ放電加工機は、テーパカット機能により部品加工が可能となっているが、ワイヤのテーパ角度が大きくなればなるほど、テーパ角度誤差が大きくなることが問題視とされている。

従来のプレス抜き型の逃げ面加工等においては、約 3°程度のテーパ角度であるが、部品加工においてはその必要性に応じて、広角テーパが要求されることとなる。本章においては、テーパカット加工誤差の発生原因について調査実験を行い、数式等を用いての誤差の発生割合等について述べる。

通常の加工において、ワイヤはテーブル面または、工作物面に対して垂直を保った状態で行われる。これに対し、テーパ加工は、ワイヤを所定の角度に傾けて加工を行う。

加工機のテーパ加工装置の全体図については図 3.2 に表したとおり、下部ガイド位置を固定して、上部のガイドを U 軸（もしくは V 軸）に移動させることで、目的とするワイヤの傾き角を得ることができる。

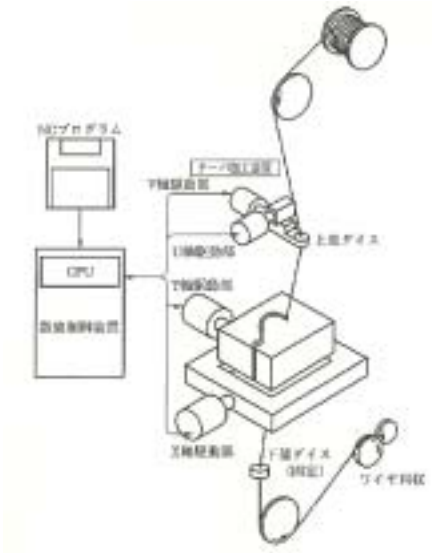


図 3.2　テーパ加工装置の構成

3.3　研究目的

ワイヤカット放電加工機はテーパカット機能の搭載によって部品加工が可能となり、その必要に応じた高精度テーパ加工技術の重要性がよりいっそう高まっている。

しかしながら、広角テーパ加工においては、ワイヤを支持するダイヤモンドダイスと、ワイヤとの接触等によりワイヤが振動し、加工面に筋が発生することや、ダイヤモンドダイスのワイヤ支持位置の変化、ワイヤ自体の強さによって目標テーパよりプラステーパに傾いてしまうことなどから、テーパ加工精度の悪化が問題視されている。

本研究においては、テーパ加工誤差の発生原因の追究と、Z 軸諸元出し段階での上下ダイス間距離に及ぼす誤差の要因に対して、数式や、解析ソフトを用いることにより誤差の発生割合を求め、改善策を検討するなど、テーパカット加工の高精度化を目的とした研究を行った。

3.4　実験機器及び加工条件表

3.4.1　実験機器

(1)　ワイヤ放電加工機　三菱電機製　DIAX　SX10　(第 2 章　図 2.2 参照)

(2)　垂直度計　(図 3.3 参照)

機械に付属の垂直度計を用い、加工面に垂直度計を固定し、NC 制御装置の機能である垂直測定プログラムで、上下測定刃(図 3.3 の赤丸の部分)にワイヤを接触させ、自動計測、調整をすることができる。また、上下ダイス間距離を求める諸元出しにおいても、この垂直度計を用いる。

(3)　ワイヤ電極　沖電線製　OB-20P　φ0.2mm　黄銅ワイヤ

(4)　加工材料　SKD-11　板厚 10mm

(5)　測定顕微鏡　MITUTIYO 製　TF-510F　（第 2 章　図 2.3 参照）

(6)　ブロックゲージ　MITUTOYO 製

(7)　レーザ測定器　KEYENCE 製　(図 3.4 参照)

レーザ測定器はワイヤ放電加工機自体の X 軸、Y 軸、U 軸、V 軸のバックラッシュ等の機械自体の精度の調査を行った。またワイヤ幅の測定にもこのレーザ測定器を使用した。

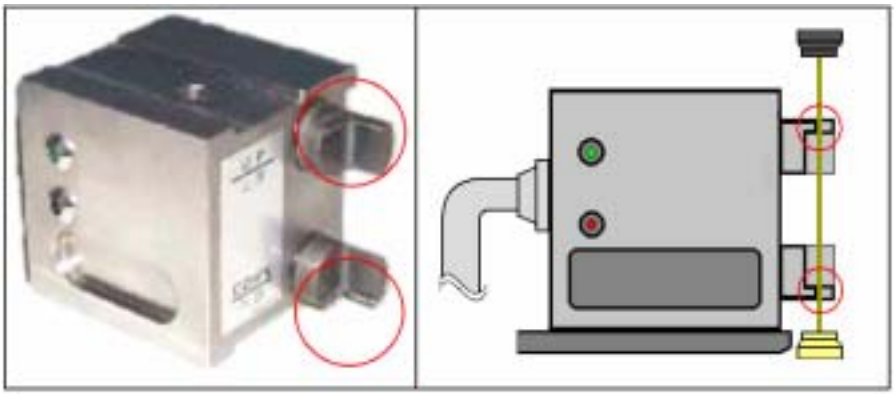


図 3.3　垂直度計

図 3.4　高速・高精度デジタル寸法測定器の外観写真

3.4.2　加工条件表

表 3.1　加工条件表

加工段階	通常加工	1～6 度	7～12 度	13～20 度
E パック番号	379	201	202	203
V0 （ノッチ）電圧切換え	12	12	12	12
IP （ノッチ）加工セッテイング	7	7	5	5
OFF （ノッチ） 休止時間	1	1	1	1
SA （ノッチ）安定回路 A	3	3	3	2
SB （ノッチ） 安定回路 B	10	12	13	13
WS （ノッチ）ワイヤ速度	12	12	12	12
WT （ノッチ） ワイヤ張力	8	7	7	6
PT （ノッチ） プリテンション	14	14	14	14
LQ （ノッチ） 加工液流量	2	2	2	2
LR （ノッチ） 加工液比抵抗	9	9	9	9
VG （ノッチ） 平均加工電圧	43 (41～45)	48 (46～50)	48 (46～50)	53 (48～58)
SC （ノッチ） 安定回路 C	1	1	1	1
FS （ノッチ） FS 電源	1	1	1	1
AE （ノッチ） 電源モード	21	21	21	21
SE （ノッチ） 安定回路 E	1	1	1	1

3.5　諸元出し方法

3.5.1　Z 軸諸元

テーパ加工時の Z 軸諸元の設定

テーパカットを行うにあたり、図 3.5 に示すとおり、Z 軸の各諸元値を求めておく必要がある。Z 軸諸元値については、Z1、Z2、Z3、Z4、Z5 があり、加工に先立ってあらかじめ求めておき、制御装置に基礎データとして入力しておく必要がある。以下に、各諸元値とその意味を説明する。

Z1：プログラム寸法高さ

テーブル面からの高さでプログラムの高さを指定。テーパ加工時のワイヤの回転中心高さを与える。

Z2：速度指令高さ

定速送り加工時、指令送り速度を与える高さを指定する。

Z3：上部ガイドスパン

テーブル面から上部ガイドまでの距離。Z 軸の上昇下降に同期して変化する。

Z4：下部ガイドスパン

テーブル面から下部ガイドまでの距離。

Z5：任意形状指定高さ

上下任意形状加工を行うときの任意形状の高さを指定。通常のテーパ加工の際には、Z1 と Z5 の間で指定されたテーパ角度の計算が行われる。

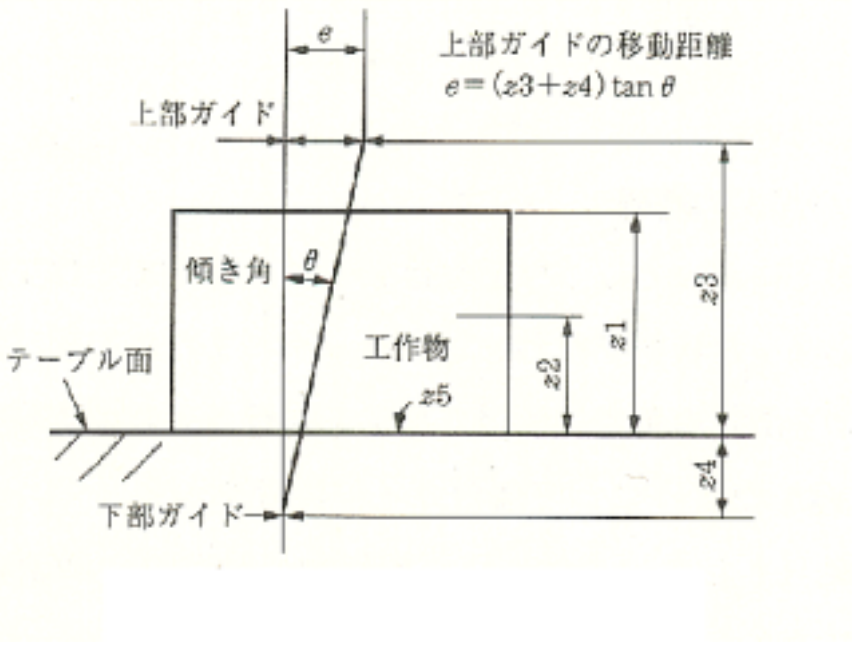


図 3.5　Z 軸諸元値の説明図　（参考文献「ワイヤ放電加工」より）

3.5.2　諸元出し方法

テーパ諸元値を加工機に与えることにより、テーパカット加工を行うことができる。以下にテーパ諸元出しを行う手順を述べる。

まず、仮の値として$\theta = 5^{\circ}$、$g = 70.1$を設定して上部ダイスの移動量 e を計算する。

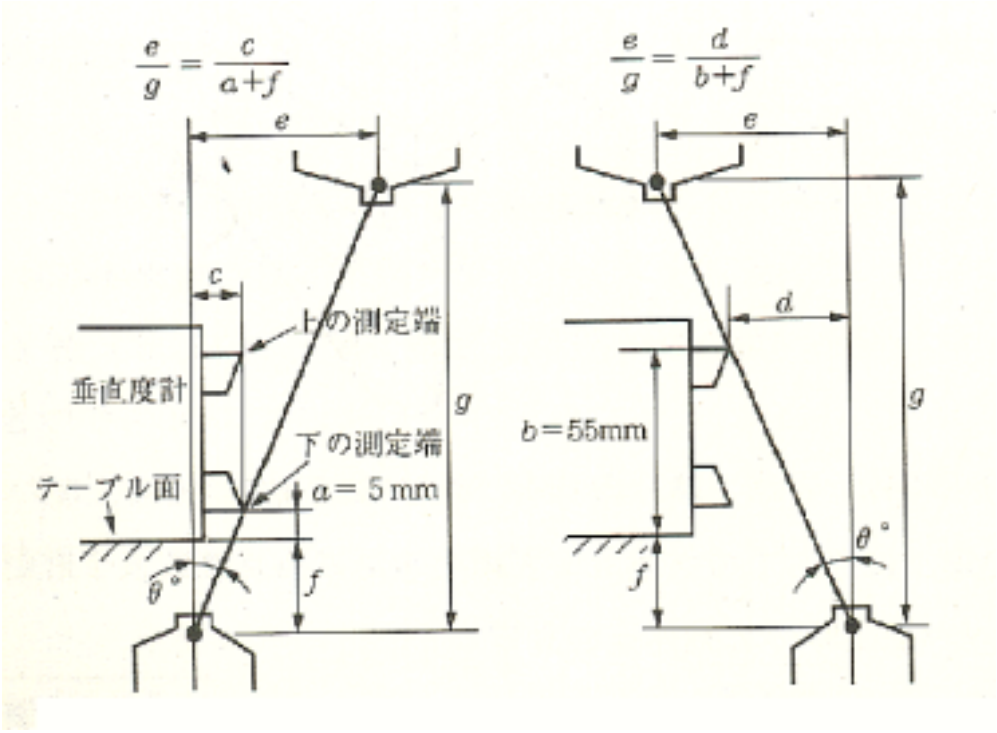
例）　$e = 70.1 \times \tan 5 = 6.133$

ワイヤが垂直で垂直度計の測定端に接触している状態で U 軸を e の値だけ移動し、ワイヤが離れるので、垂直度計の下の測定端に接触するまで、X 軸をマイナス方向に移動させ、その距離 c を求める。図 3.6（a）

次に、ワイヤが垂直度計から十分離れるように X 軸をプラス方向に移動させ、U 軸を上で求めた e の値だけマイナス方向に移動し、ワイヤの傾きを逆の方向にする。この状態から、X 軸を再度マイナス方向にワイヤが上の測定端に接触するまで移動させ、このときの X 軸の移動量 d を求める。図 3.6（b）

以上の操作で求めた値の間には、次の関係式が成り立ち、これから f（すなわち Z4）と、g－f（すなわち Z3）とを次式から求めることができる。

$$f = \frac{bc - ad}{d - c} \qquad g = \frac{e(a + f)}{c}$$



（a）　　（b）

図 3.6　諸元出し操作方法　　（参考文献「ワイヤ放電加工」より）

ここで、a：テーブル面から垂直度計の下の測定端までの距離
b：テーブル面から垂直度計の上の測定端までの距離

今回使用した垂直時計については、a＝5、b＝55mm であり、これらの値を上式に代入することで Z4 および Z3 を算出することができる。

今回使用した、ワイヤ放電加工機においても、この諸元出しを自動設定するソフトプログラムが組み込まれており、ワイヤの垂直度調整後、垂直度計の測定端近傍にワイヤを近づけて、このプログラムをスタートすれば、自動計算し Z3、Z4 の読み込みを行う。

3.6　テーパ角度の測定方法

3.6.1　テーパ加工面の角度測定方法

測定顕微鏡を用いてテーパ角度の測定を行う方法について説明する。図 3.7 のようにテーパ加工面に対して、測定位置（1）に位置をあわせ、そこから測定位置（2）までの X 軸と Y 軸移動量から、$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{X軸移動量}}{\text{Y軸移動量}}\right)$でテーパ角度を求める。

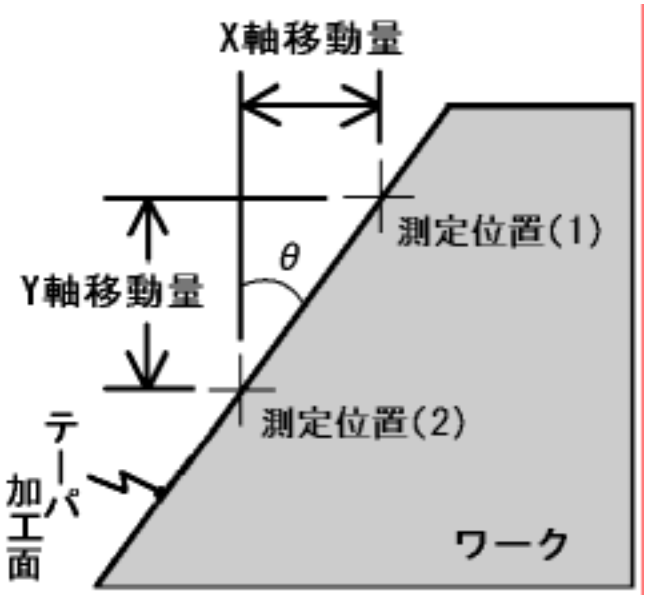


図 3.7　テーパ加工面の角度測定方法

3.7　テーパカット加工実験

3.7.1 テーパ加工後のワークのテーパ加工面の角度の調査実験

（1）実験目的

テーパ加工の調査実験として、加工後のテーパ面の角度調査を行う。テーパ角度に対する加工誤差の変化を求めることを目的とした。

（2）実験方法

自動諸元出しを行い、（諸元出し角度 5 度）その諸元値を用いて 1～20 度までのテーパ加工を行い、テーパ角度の測定を行う。加工後のテーパ角度の測定は、測定顕微鏡を用い、方法は、前記の図 3.7 に現した通り、X 軸、Y 軸の移動量から求める。

加工後のテーパ面の測定は、Y 軸を 3mm 移動させた場合の X 軸方向の移動量を求め、$\theta = \tan^{-1}\left(\dfrac{\text{X軸方向の移動量}}{3\text{mm}}\right)$でテーパ角度を求める。

（3）実験条件

Z 軸諸元出しは、自動諸元出し操作にて行った。諸元出し角度　5.001 度

諸元値の値　Z3=18.457mm　⊿Z3=7.937mm　 Z4=7.939mm

加工条件

テーパカット加工は、加工条件一定で E200、加工速度（最適送り）オフセット量 133μm で加

工を行った。

（4）実験結果

表 3.2 は 1～5 度、10 度 15 度 20 度の測定結果を示す。表 3.2.は、テーパ角度に対する角度誤差をまとめて表し、図 3.8 はこれをグラフ化したものである。

表 3.2　測定結果と角度誤差

NC での設定角度（度）	1	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.052	0.053	0.052	0.052
測定角度（度）	0.993027	1.01212	0.993027	0.993027
設定角度との差（度）	-0.00697	0.01212	-0.00697	-0.00697
測定角度平均（度）	0.997801	設定角度との差平均（度）		-0.0022
NC での設定角度（度）	2	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ (mm)	0.104	0.106	0.105	0.105
測定角度（度）	1.985459	2.023609	2.004534	2.004534

設定角度との差　（度）	-0.01454	0.023609	0.004534	0.004534
測定角度平均　（度）	2.004534	設定角度との差平均（度）		0.004534
NC での設定角度（度）	3	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　(mm)	0.158	0.158	0.157	0.158
測定角度　（度）	3.014792	3.014792	2.995746	3.014792
設定角度との差　（度）	0.014792	0.014792	-0.00425	0.014792
測定角度平均　（度）	3.010031	設定角度との差平均（度）		0.010031
NC での設定角度（度）	4	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　(mm)	0.21	0.213	0.21	0.209
測定角度　（度）	4.004173	4.061185	4.004173	3.985167
設定角度との差　（度）	0.004173	0.061185	0.004173	-0.01483
測定角度平均　（度）	4.013675	設定角度との差平均（度）		0.013675
NC での設定角度（度）	5	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　(mm)	0.264	0.265	0.262	0.264
測定角度　（度）	5.029074	5.048025	4.991168	5.029074
設定角度との差　（度）	0.029074	0.048025	-0.00883	0.029074
測定角度平均　（度）	5.024335	設定角度との差平均（度）		0.024335
NC での設定角度（度）	10	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　(mm)	0.532	0.534	0.532	0.534
測定角度　（度）	10.05591	10.09294	10.05591	10.09294
設定角度との差　（度）	0.055911	0.09294	0.055911	0.09294
測定角度平均　（度）	10.07443	設定角度との差平均（度）		0.074426
NC での設定角度（度）	15	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　(mm)	0.81	0.811	0.809	0.81
測定角度　（度）	15.10958	15.12737	15.09177	15.10958
設定角度との差　（度）	0.109575	0.127375	0.091773	0.109575
測定角度平均　（度）	15.10957	設定角度との差平均（度）		0.109574
NC での設定角度（度）	20	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　(mm)	1.098	1.097	1.1	1.1
測定角度　（度）	20.10263	20.08578	20.1363	20.1363
設定角度との差　（度）	0.102626	0.085782	0.136303	0.136303
測定角度平均　（度）	20.11525	設定角度との差平均（度）		0.115254

表 3.3　テーパ角度変化に対する角度誤差

NC での設定角度（度）	誤差平均（度）	NC での設定角度（度）	誤差平均（度）
1	-0.002199411	5	0.024334936
2	0.004533921	10	0.074425648
3	0.010030801	15	0.109574376
4	0.013674566	20	0.115253543

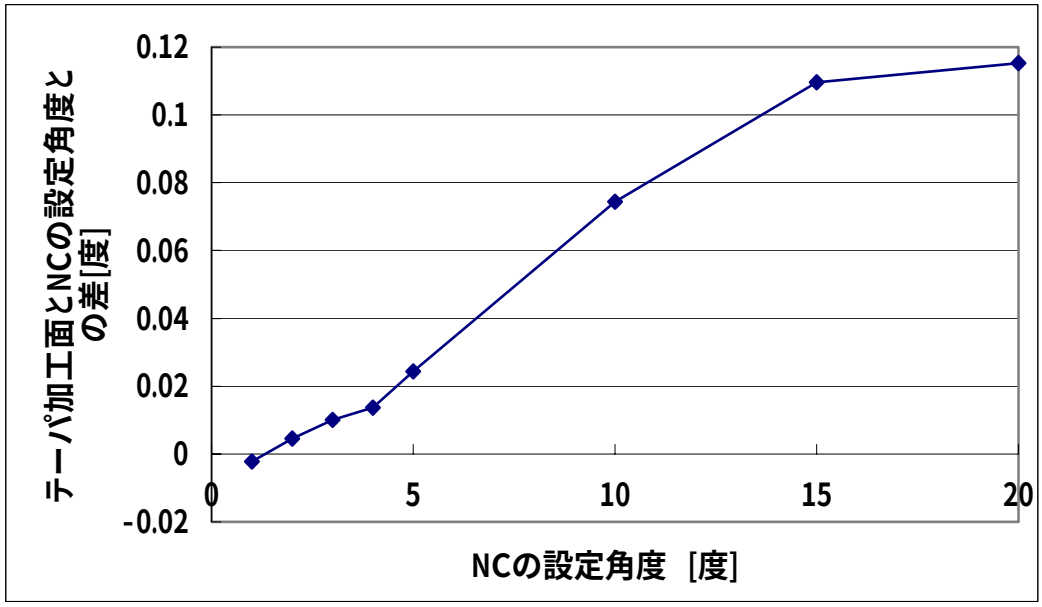


図 3.8　テーパ角度の変化に対する角度誤差変化

（5）考察

加工条件一定のままで、1～20 度までのテーパカット加工を行ったが、テーパ角度が大きくなるにしたがって、角度誤差も大きくなることが分かる。1 度テーパ角度に関しては、-0.002 度とわずかにマイナステーパとなったが、角度誤差としては非常に小さい。20 度テーパ角度に関しては 0.115 度と大きな誤差が発生している。この原因は、ワイヤを大きく傾けた場合に、ダイヤモンドダイスでのワイヤ支点が変化したことで、見かけ上のダイス間距離が変化し、誤差を大きくしてしまっていると考えることができる。今回は、加工条件一定で 1～20 度テーパの加工を行ってみたが、テーパ角度が大きくなるにつれて加工電圧の変動が激しくなり、短絡現象も見られた。これは、ワイヤを支えるダイヤモンドダイスと、ワイヤ間の摩擦が大きくなり、ワイヤが振動した結果、加工不安定となり短絡現象をおこしたものと考えられる。

3.7.2　ワイヤテンションの変化に対するテーパ誤差と加工状態の変化

（1）実験目的

角度誤差の調査実験の段階では、2～20 度テーパ角度までを加工条件をすべて一定で加工を行っていたが、テーパ角度が大きくなった場合、加工が不安定になる傾向が見られた。この原因としては、テーパ角度が大きい場合のダイヤモンドダイスとワイヤの摩擦が大きくなっていることが考えられる。ワイヤのテンションを変化させて加工を行った場合の加工の安定性について検討を行う。

（2）実験方法

加工条件を一定とし、ワイヤテンションのみを変化させて 20 度テーパの加工を行う。加工後、テーパ面の角度測定を行い、ワイヤテンションの変化に対する角度誤差の変化を求める。また、加工中の電圧の変化を比較するため、テーパ加工途中でワイヤテンションを変化させ、VF モニターを使用し、加工中の加工電圧の変化を測定する。

（3）実験条件

Z 軸の諸元値出しは、自動諸元出しで求めた。諸元出し角度 5.000 度

各諸元値は、Z3=18.457mm　⊿Z3=7.937mm　Z4=7.939mm　Z5=10.384mm

加工条件は E200 を用い、ワイヤテンションは設定ノッチで 5～8 のノッチまで変化させて加工を行う。

（4）実験結果

以下に、各ワイヤテンションに対する角度測定結果と角度誤差を表 3.4～3.7 に示した。

表 3.4　（ワイヤテンション設定値　5）

NC の設定角度　（度）	20	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　（mm）	1.113	1.112	1.113	1.113
測定角度　（度）	20.35485	20.33806	20.35485	20.35485
設定角度との差　（度）	0.354854	0.338064	0.354854	0.354854
測定角度平均　（度）	20.35066	設定角度との差平均（度）		0.350656

表 3.5　（ワイヤテンション設定値　6）

NC の設定角度　（度）	20	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　（mm）	1.106	1.105	1.107	1.107
測定角度　（度）	20.23725	20.22043	20.25406	20.25406
設定角度との差　（度）	0.237249	0.220434	0.254061	0.254061
測定角度平均　（度）	20.24145	設定角度との差平均（度）		0.241451

表 3.6　(ワイヤテンション設定値　7）

NC の設定角度　（度）	20	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　（mm）	1.098	1.098	1.1	1.1
測定角度　（度）	20.10263	20.10263	20.1363	20.1363
設定角度との差　（度）	0.102626	0.102626	0.136303	0.136303
測定角度平均　（度）	20.11946	設定角度との差平均（度）		0.119465

表 3.7（ワイヤテンション設定値　8）

NC の設定角度　（度）	20	角度測定の Y 軸方向の移動量は、3mm		
X 軸測定長さ　（mm）	1.098	1.097	1.098	1.097
測定角度　（度）	20.10263	20.08578	20.10263	20.08578
設定角度との差　（度）	0.102626	0.085782	0.102626	0.085782
測定角度平均　（度）	20.0942	設定角度との差平均（度）		0.094204

図 3.9 にワイヤテンションの変化に対するテーパ誤差の変化をグラフに表した。

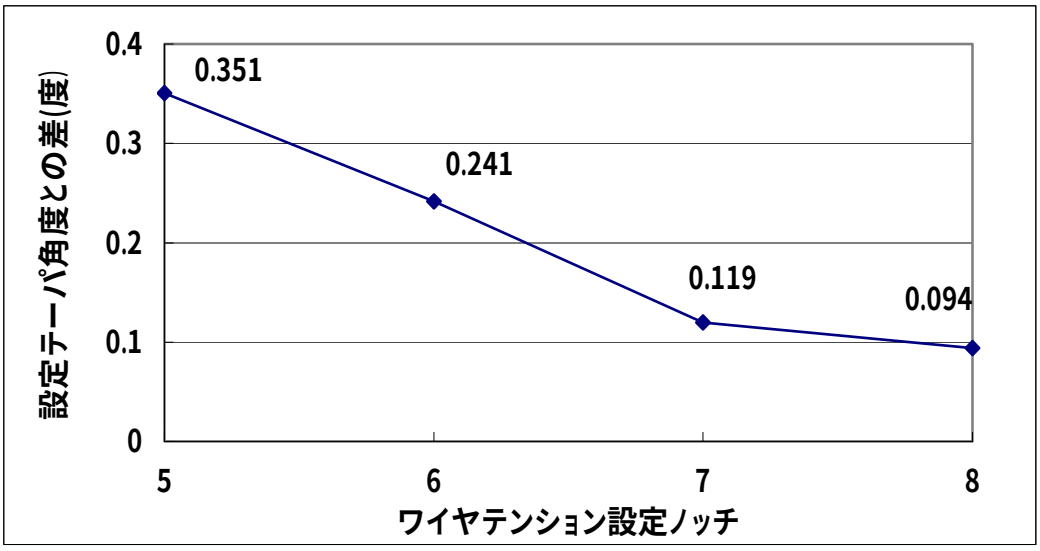


図 3.9　ワイヤテンションと角度誤差の変化　（20°テーパ）

ワイヤテンションを変化に対する加工電圧変化

ワイヤテンションを変化させた場合の加工電圧、加工速度の変化と短絡の有無を VF モニターによって測定した。測定結果を図 3.10 と図 3.11 に表した。図 3.10 はテーパカット加工面でワイヤテンションを順に変化をさせた場合の加工電圧の変化を 3 次元で表し、図 3.11 は、この電圧の変化を 2 次元のグラフに表したものである。

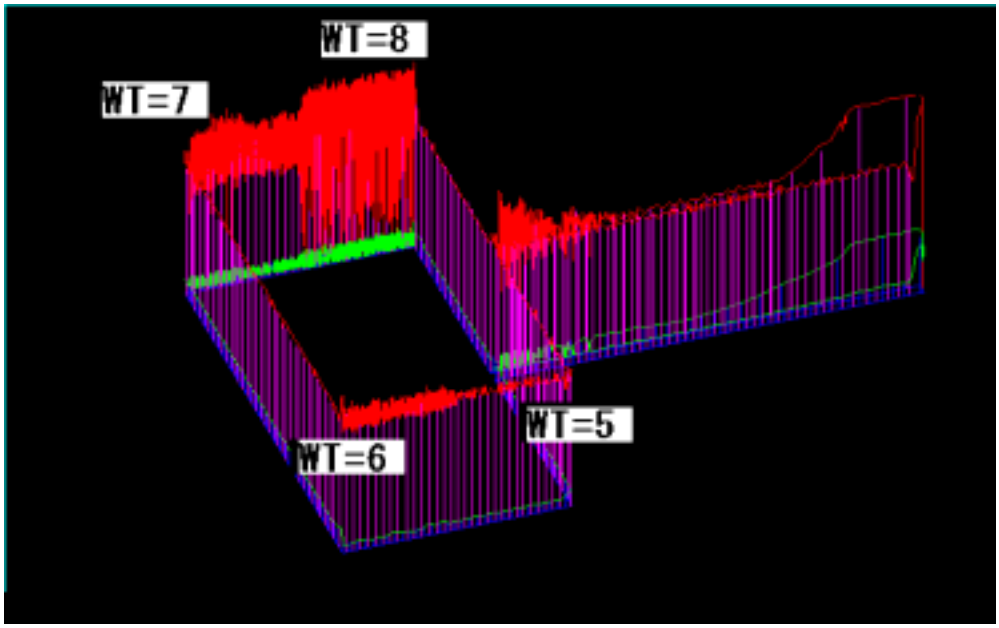


図 3.10　ワイヤテンション変化に対する加工電圧の変化（3 次元）

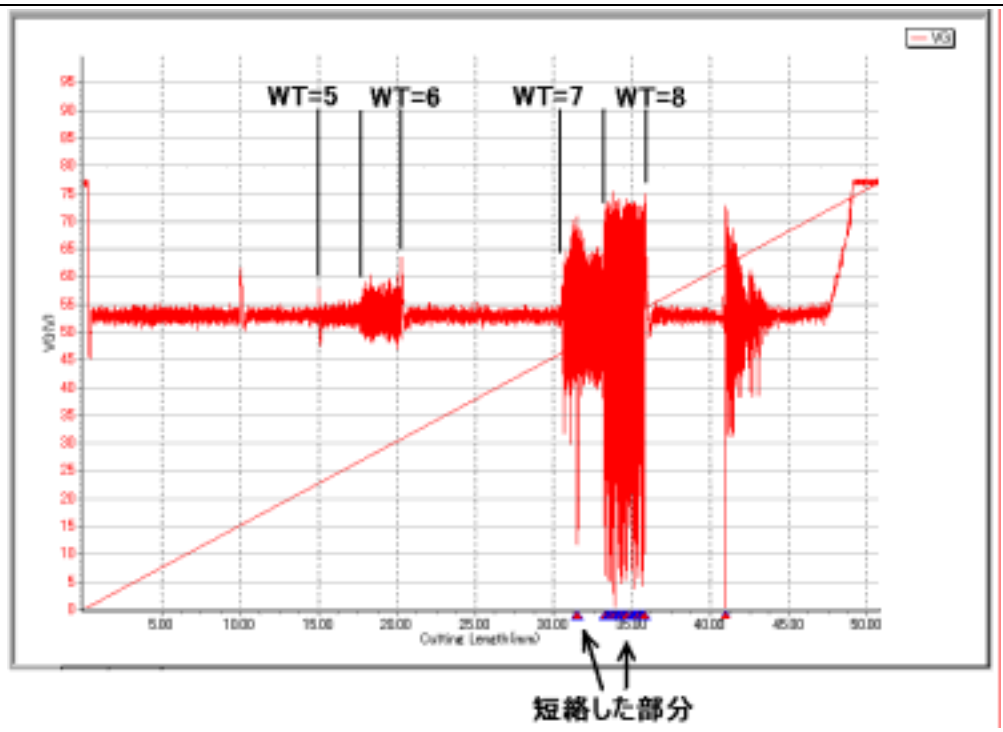


図 3.11　ワイヤテンション変化に対する加工電圧の変化（2 次元）

以下にワイヤテンションの変化に対する加工電圧、加工速度を表 3.8 に表した。

表 3.8　ワイヤテンションの変化に対する加工電圧、加工速度の変化

	最小加工電圧（V）	最大加工電圧（V）	平均加工電圧（V）	最小加工速度（mm/min）	最大加工速度（mm/min）	平均加工速度（mm/min）
WT=5	47.47	57.87	52.87	1.93	4.86	2.29
WT=6	47.03	60.36	53.01	1.67	3.11	2.28
WT=7	11.86	70.91	53.68	0.10	4.89	2.23
WT=8	0.58	75.31	55.26	0.01	5.46	1.82

ワイヤテンションの変化に対する 20 度テーパ加工面の写真

以下に、各値ワイヤテンションで加工を行った場合でのテーパカット加工の加工面の写真を図 3.12～図 3.15 に表した

図 3.12 ワイヤテンション設定値　5 ノッチ

図 3.13 ワイヤテンション設定値　6 ノッチ

図 3.14 ワイヤテンション設定値　7 ノッチ

図 3.15 ワイヤテンション設定値　8 ノッチ

（5）考察

図 3.9 を見て分かる様に、ワイヤテンションが強いほど角度誤差が小さくなることが分かるが、加工の安定性を加工電圧の変化で見た場合、ワイヤテンションが強くなるにつれ、電圧の変化が激しく、図 3.11 からも短絡現象の発生箇所が見られた。また、各ワイヤテンションで加工されたワーク表面の写真においては、テンションが強くなるにつれて表面に縦スジの発生が見られた。ワイヤテンション設定値 8 ノッチで加工されたワーク表面（図 3.15）は、目で見てもはっきりと分かる程の筋が残されていた。

このスジの発生は、短絡現象によって残されたものであることが考えられるが、短絡現象は、ワイヤの振動が原因であると思われる。ワイヤテンション設定値 8 ノッチで 20 度テーパにワイヤを傾け、ワイヤを送ってみたところ振動していることが分かった。これに関しては、ワイヤを支えているダイヤモンドダイスとワイヤが、テーパ角度が大きくなったことで、摩擦が大きくなったからだと考えられる。ワイヤテンション設定値 5 ノッチで加工を行った場合には、加工電圧の変動も小さく縦筋の発生も見られなかったことから、ワイヤの振動も小さいということが考えられる。

よって今後のテーパ加工においては、テーパ角度に応じて、前記、加工条件の表 3.1 のとおりに条件を設定して加工を行うこととした。

3.7.3　加工後の角度誤差を補正値として加工を行う実験

（1）実験目的

テーパ角度が大きくなるにつれて NC の設定テーパ角度と加工後のテーパ面の角度の差が大きくなる傾向が見られたが、その角度差を求め、次の NC 設定角度に補正角度として与え、加工する方法でテーパ角度誤差を小さく抑えることを目的とした。

（2）実験方法

NC の設定角度 12 度、14 度、16 度、18 度、20 度でそれぞれテーパカット加工を行う。加工後、測定顕微鏡を用いてワークのテーパ角度を測定し、NC の設定テーパ角度と加工後、テーパ面の角度の差を求める。測定時の Y 軸の移動量は 5mm とし、10 回測定を行った結果からワークのテーパ角度を求め、NC の設定角度との角度の差を求める。

求められた角度の差は、補正角度として NC の設定テーパ角度に与え、補正加工を行う。設定テーパ角度を補正する加工は各テーパとも 2 回まで行った。

（3）実験条件

Z 軸諸元出しは、自動諸元出し機能を用いて自動入力を行った。諸元出し角度 4.998 度

Z3=18.556mm　⊿Z3=7.911mm　Z4=7.934mm

加工条件

12 度は E202　14 度 16 度 18 度 20 度は E203 を使用して加工を行った。

加工速度　最適送り　オフセット量 133μm

加工形状は、図 3.16 のような、片側にテーパ面を持たせた形状を加工した。

加工後のテーパ角度の測定について、測定顕微鏡の Y 軸移動量は、5mm で測定を行い、10 回測定を行った平均からテーパ角度の割り出しを行った。

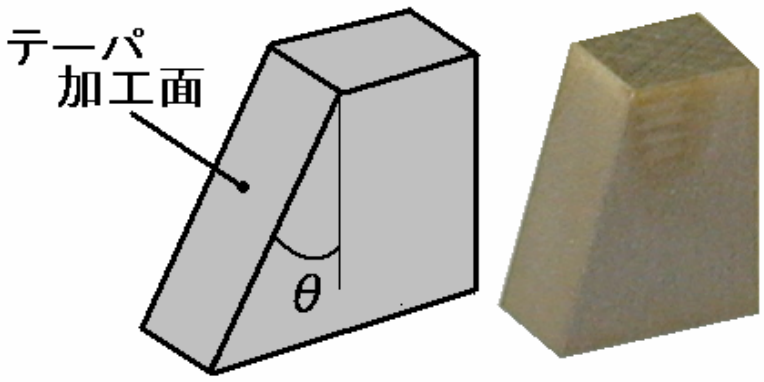


図 3.16　加工形状

（4）加工結果

表 3.9　12 度テーパ

目標テーパ角度　12 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量　（mm）	5.631	5.567	5.517
テーパ入力角度　（度）	12.000	11.868	11.764
平均測定結果（X 軸移動量）　（mm）	1.0748	1.0603	1.0622
テーパ角度結果　（度）	12.1317	11.9728	11.9936
テーパ誤差　（度）	0.1317	-0.0272	-0.0064
入力角から見たテーパ誤差　（度）	0.1317	0.1045	0.2298
目的テーパからの角度の差　（度）	0.1317	-0.0272	-0.0064

表 3.10　14 度テーパ

目標テーパ角度　14 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量　（mm）	6.605	6.522	6.423
テーパ入力角度　（度）	14.000	13.832	13.630
平均測定結果（X 軸移動量）　（mm）	1.2622	1.2498	1.2463
テーパ角度結果　（度）	14.1677	14.0341	13.9967
テーパ誤差　（度）	0.1677	0.0341	-0.0033
入力角から見たテーパ誤差　（度）	0.1677	0.2018	0.3663
目的テーパからの角度の差　（度）	0.1677	0.0341	-0.0033

表 3.11　16 度テーパ

目標テーパ角度　16 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量　（mm）	7.569	7.456	7.319
テーパ入力角度　（度）	16.000	15.720	15.446
平均測定結果（X 軸移動量）　（mm）	1.4602	1.4332	1.4335
テーパ角度結果　（度）	16.2799	15.9944	15.9976
テーパ誤差　（度）	0.2799	-0.0056	-0.0024
入力角から見たテーパ誤差　（度）	0.2799	0.2743	0.5518
目的テーパからの角度の差　（度）	0.2799	-0.0056	-0.0024

表 3.12　18 度テーパ

目標テーパ角度　18 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量　（mm）	8.607	8.463	8.370
テーパ入力角度　（度）	18.000	17.717	17.534
平均測定結果（X 軸移動量）　（mm）	1.6519	1.615	1.6204
テーパ角度結果　（度）	18.2825	17.9005	17.9565
テーパ誤差　（度）	0.2825	-0.0995	-0.0435
入力角から見たテーパ誤差　（度）	0.2825	0.1830	0.4220
目的テーパからの角度の差　（度）	0.2825	-0.0995	-0.0435

表 3.13　20 度テーパ

目標テーパ角度　20 度	補正なし	補正 1 回目	補正 2 回目
U 軸移動量　（mm）	9.642	9.470	9.483
テーパ入力角度　（度）	20.000	19.672	19.368
平均測定結果（X 軸移動量）　（mm）	1.8523	1.8175	1.8212
テーパ角度結果　（度）	20.3277	19.9762	20.0136
テーパ誤差　（度）	0.3277	-0.0238	0.0136
入力角から見たテーパ誤差　（度）	0.3277	0.3039	0.6452
目的テーパからの角度の差　（度）	0.3277	-0.0238	0.0136

目的テーパ角度からの、加工テーパ面の角度の差を表 3.14 にまとめ、これをグラフに表したものを図 3.17 に示した。

表 3.14　目的テーパ角度からのテーパ誤差

測定角度（度）	通常加工 目的テーパからの 角度の差　（度）	補正 1 回目 目的テーパからの 角度の差　（度）	補正 2 回目 目的テーパからの 角度の差　（度）
12	0.1317	-0.0272	-0.0064
14	0.1677	0.0341	-0.0033
16	0.2799	-0.0056	-0.0024
18	0.2825	-0.0995	-0.0435
20	0.3277	-0.0238	0.0136

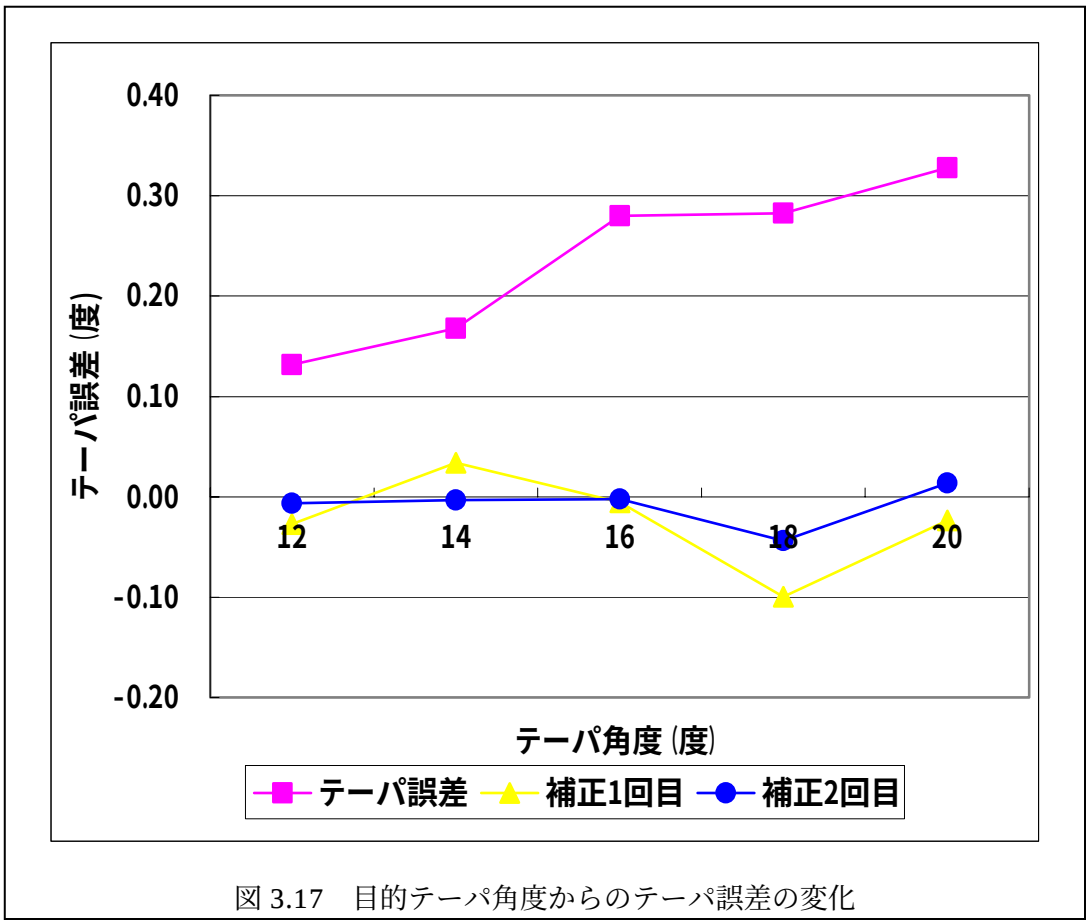


図 3.17　目的テーパ角度からのテーパ誤差の変化

（5）考察

図 3.17 を見て分かる様に、補正を行うごとに角度誤差を小さく抑えることができた。このような加工結果から求められたテーパ誤差を、次の加工の補正角度として与え、テーパ誤差を小さく抑える方法に関しては、テストカットを行う必要があること、また実際のワイヤの傾きを測定せず NC で計算され、設定されたワイヤの傾き角度が正しいとして加工を行っているため、実際のワイヤの傾き角度が何度に傾けられていたのかが分からないため、加工後のテーパ角度誤差がワイヤの傾き自体の設定誤差であるのか、それとも加工誤差が大きいのか判断ができない状態である。このため、テーパ加工の精度を向上させるためには、ワイヤの傾き角度を測定し、求められた角度と、加工後、ワークのテーパ面の角度との差を求め、加工誤差を正確に求めることが必要である。

3.8　諸元出しについての検討

諸元出し方法については、3.5 諸元出し方法で説明した。これまでの実験の推移から、ワイヤを正確に傾けることと、ワイヤの傾き角度を正確に測定することが重要であると考えられたが、ワイヤの傾きを求める方法を検討中に、諸元出し方法の重要な問題点が浮かび上がってきた。よって以下の実験ではでは、諸元出し方法の問題点と、ワイヤの傾き設定方法について検討した。

3.8.1　諸元出し方法を用いたワイヤの傾き角度の測定方法の検討

従来の諸元出し手順を用いてワイヤの傾き角度を求める方法について検討した。図 3.17 は、諸元出し時に必要な値と測定値を分かりやすく、図 3.18 で表したものである。

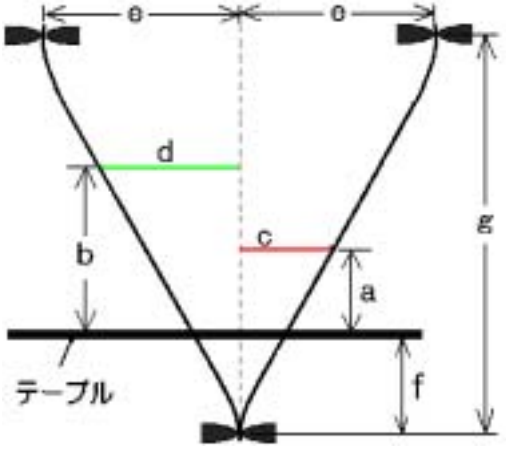


図 3.17　諸元出し方法

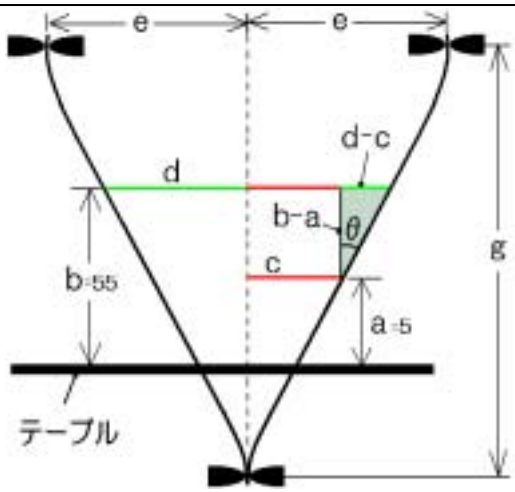


図 3.18　ワイヤの傾き測定方法

従来の諸元出し方法では、諸元出し後に求められた上下ガイド間距離と、諸元出し中に移動したU軸移動量を用いて諸元出し角度の割り出しを行っていたが、ワイヤの強さによって、諸元出し角度が変わると上下ガイド間距離も変化してしまうことや、変形したワイヤの部分を含めた状態で諸元出しを行っていることから、諸元出しの時、ワイヤの傾き角度の割り出しが、正確に行うことができないのではと考え、諸元出し段階で求められる値、ｄ、ｃに注目し図 3.18 の灰色で表された三角形を用いて、ワイヤの傾き角度を求める方法を提案した。この測定方法においては、ワイヤの強さの影響を受けてない箇所でワイヤの傾き角度を求めるため、ワイヤの傾き角度が正確に求めることができるのではないかと考えたのである。ワイヤの傾き角度を求めるための式を以下に示す。

$$\text{ワイヤの傾き角度}\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d-c}{b-a}\right)$$

この方法を用いて、ワイヤの傾き角度を求めることができるのではないかと思われる。しかしながら、諸元出し方法や、提案されたワイヤの傾き角度測定方法においても、図 3.19 のように、赤色で表された三角形 C と緑色で表された三角形 D とが相似であることが条件となるが、ワイヤが径を持たない線であると考えた場合は、ワイヤの左右の傾き角度が等しければ三角形 C,D は相似であることがいえる。

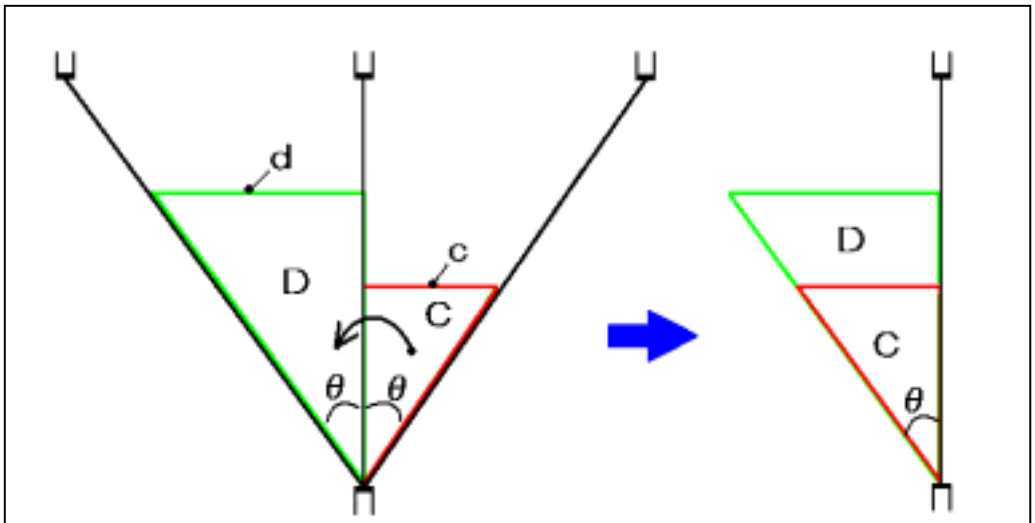


図 3.19　ワイヤを線として考えた場合の三角形 C、D

図 3.19 においては、ワイヤを線として考えた場合であるが、図 3.20 は、実際のワイヤのように径を与え、同じように三角形の相似を考えてみた。その結果、青丸で囲まれた部分を見て分かるように三角形 C がわずかに小さく、二つの三角形が相似でないことが分かる。

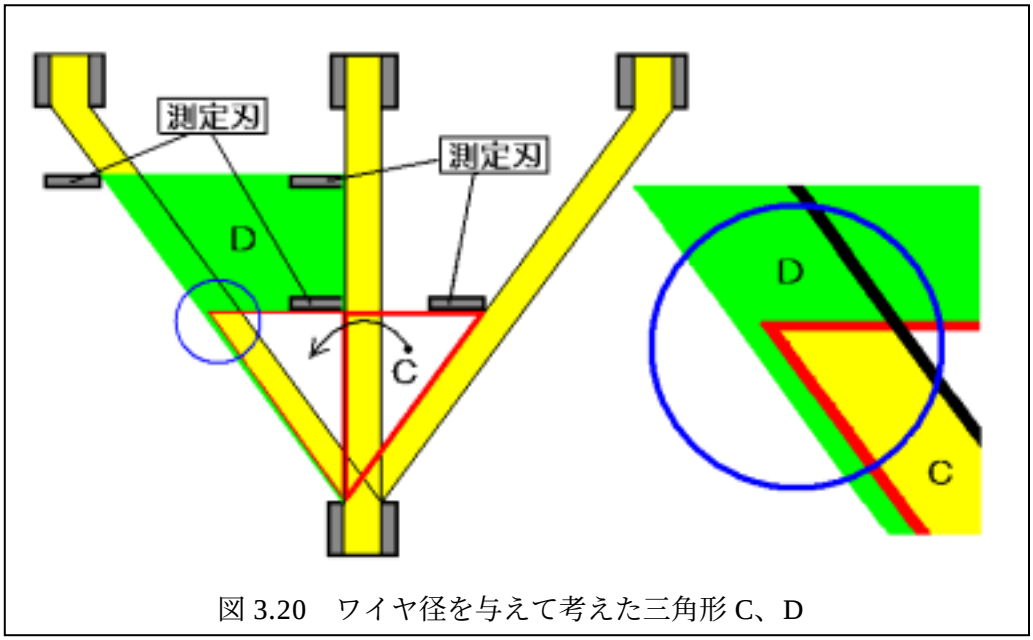


図 3.20　ワイヤ径を与えて考えた三角形 C、D

図 3.20 において三角形 C と三角形 D を重ね合わせた結果、三角形 C がわずかに小さく、二つの三角形は相似とならないことが分かった。これは図 3.21 に示す、青い矢印部分の長さは同じであるのに対して、ワイヤの幅を示す黒い矢印部分は、図 3.22 に現したように、垂直状態のワイヤ幅と、傾いた場合のワイヤ幅に差が生じることが原因である。

また、ワイヤ幅の差を K と表した場合、今回使用したワイヤの直径が 0.2mm であるため、K は以下の式で表される。

$$K = 0.2\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)$$

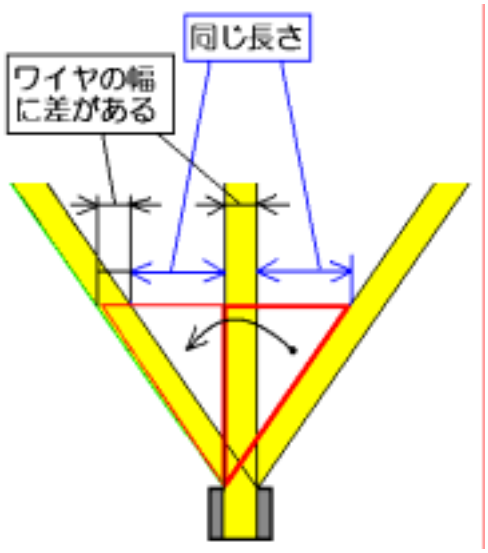


図 3.21　ワイヤ幅の差

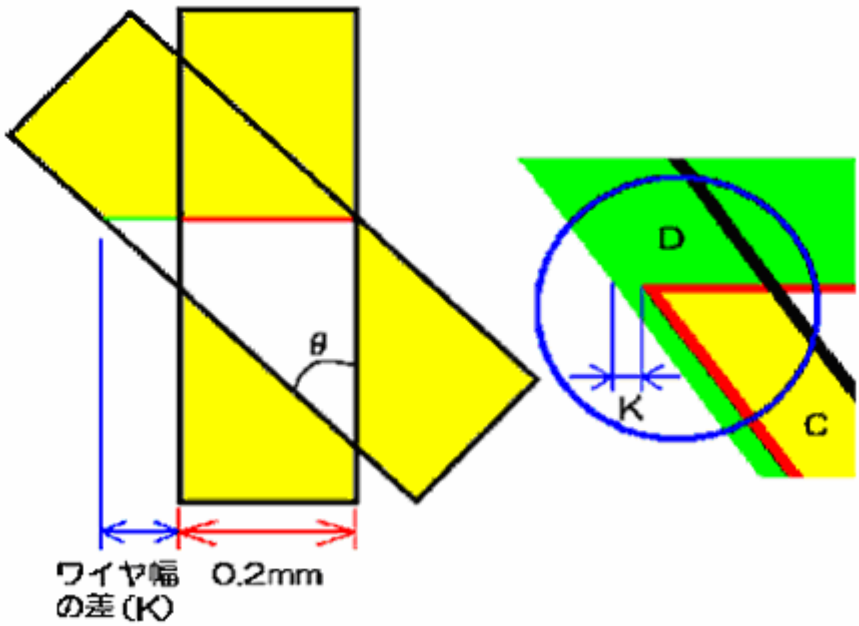


図 3.22　ワイヤ幅の誤差（K）

諸元出し段階において、垂直状態でのワイヤ幅とワイヤを傾けた場合のワイヤ幅とに差が生じることが分かったが、ワイヤの傾き角度が大きくなればなるほどワイヤ幅の差 K も大きくなることが分かる。よって、諸元出し角度の変化に対するワイヤ幅の差の変化を図 3.23 に表し、そのワイヤ幅の差から生じる角度誤差を求めたものを図 3.24 に表した。

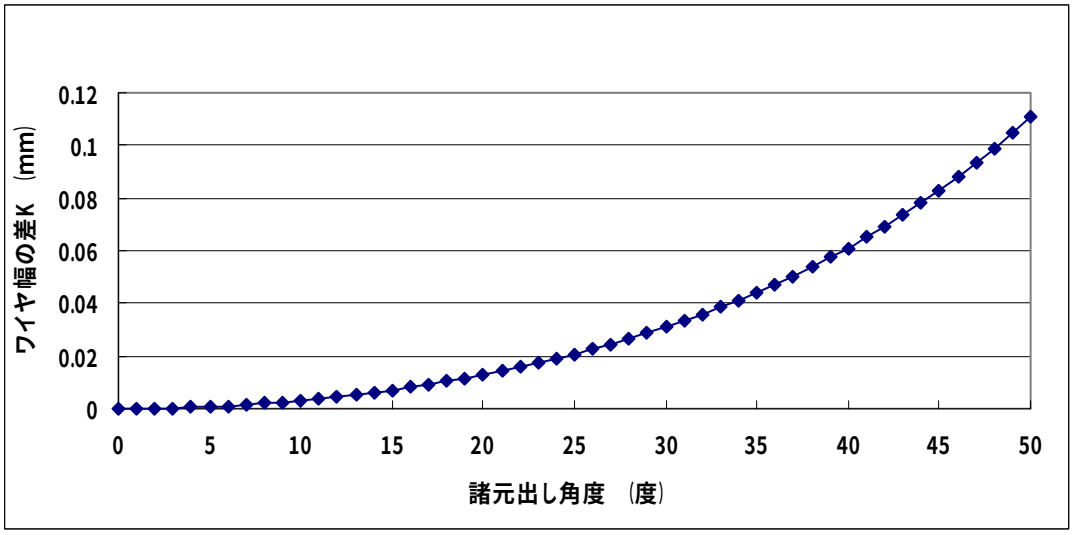


図 3.23　設定角度における K の値

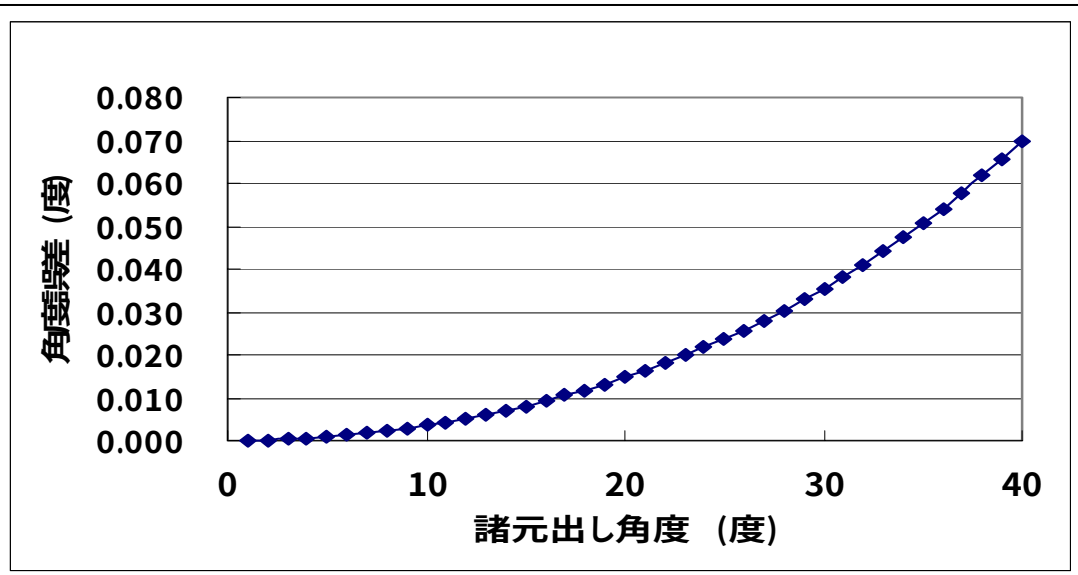


図 3.24　ワイヤ幅の差 K から生じる角度誤差

図 3.23 より、諸元出し角度が小さい場合は、ワイヤ幅の差も小さいが、ワイヤの傾きが 40 度の場合においては 0.06108mm と非常に大きな値となることが分かった。また、図 3.24 の角度誤差においても同じく 40 度の場合には 0.06999 度の角度誤差となってしまうことが明らかとなった。従来の諸元出し方法においては諸元出し角度が大きくなればなるほど、

求められる角度自体に誤差を含むことになるため、結果として従来の諸元出し方法のまま広角テーパでの諸元出しを行うことはできないことが分かる。また、始めに提案された従来の諸元出し操作を用いたワイヤの傾きを求める方法においても、同じく求められる角度に誤差を含むことから、ワイヤの傾き角度の測定に適用することはできないことが分かる。

3.8.2　新諸元出し方法

図 3.23、図 3.24 より、設定角度が大きくなるにつれ、Kの値も大きくなることが確認でき、さらにその影響が確実に角度誤差につながることが分かった。

そのため、前述で求めたKの式を利用し、諸元出しをする際にその角度にあわせた余分な誤差Kを差し引いてやる必要がある。その方程式を以下に示す。

$$f = \frac{bc - a(d - K)}{(d - K) - c}$$

$$g = \frac{e(b - a)}{(d - K) - c}$$

今実験では、従来の諸元出し方法に上記の誤差Kに対する補正を新たに加え直したものを“ 新諸元出し方法 ”として、加工を行う。

3.8.3　従来諸元出し方法と新諸元出し方法の加工実験及び比較

(1)　実験目的

前節の諸元出し方法の検討において、提案された諸元出し方法を用いて加工を行った。従来諸元出し方法と新諸元だし方法でガイド間距離を求め、それをもとに実際に加工を行い、比較した。従来諸元出し方法と新諸元だし方法でどのような改善が見られたか確認し、その結果をもとにさらなる改善を検討する。

(2)　実験方法

ワイヤ放電加工機を用い、前節の諸元出し方法の検討において提案された式を用いて、5 度、10 度、15 度、20 度でそれぞれ諸元出しを行い、ガイド間距離 g を求めた後、ワーク材料として SKD-11 板厚 10mm を用いて、加工を行った。加工後、測定顕微鏡を用いて、加工テーパ面の角度測定を行った。また、比較として従来諸元出し方法も同様に加工を行った。

(3)　実験結果

まず、テーパを目的の角度に傾けるために必要なガイド間距離 g を求めた。従来の諸元出し方法と新諸元出し方法によって求められる各値は以下の表 3.15、表 3.16 に示す。またガイド間距離 g の比較も行った。

表 3.15　従来の諸元出し方法によって求められる各値

諸元出し角度（度）	5	5	10	10
仮ガイド間距離（mm）	70.100	87.017	70.100	86.716
U軸移動量（mm）	6.133	7.613	12.361	15.290
a (mm)	5.000	5.000	5.000	5.000
b (mm)	55.000	55.000	55.000	55.000
c (mm)	0.991	1.233	1.988	2.458
d (mm)	4.515	5.606	9.115	11.277
f (mm)	9.061	9.098	8.947	8.936
g (mm)	87.017	87.045	86.716	86.690

諸元出し角度（度）	15	15	20	20
仮ガイド間距離（mm）	70.100	86.647	70.100	86.760
U軸移動量（mm）	18.783	23.217	25.514	31.578
a (mm)	5.000	5.000	5.000	5.000

b (mm)	55.000	55.000	55.000	55.000
c (mm)	3.021	3.735	4.108	5.083
d (mm)	13.860	17.135	18.812	23.310
f (mm)	8.936	8.937	8.969	8.944
g (mm)	86.647	86.630	86.760	86.624

表 3.16　新諸元出し方法によって求められる各値

諸元出し角度（度）	5	5	10	10
仮ガイド間距離（mm）	70.100	87.017	70.100	86.716
U軸移動量（mm）	6.133	7.613	12.361	15.290
a (mm)	5.000	5.000	5.000	5.000
b (mm)	55.000	55.000	55.000	55.000
c (mm)	0.994	1.236	1.994	2.468
d (mm)	4.515	5.614	9.116	11.289
K（mm）	0.001	0.001	0.003	0.003
D（mm）	0.514	5.613	9.113	11.286
f (mm)	9.118	9.118	9.005	8.994
g (mm)	87.110	87.045	86.815	86.799

諸元出し角度（度）	15	15	20	20
仮ガイド間距離（mm）	70.100	86.639	70.100	86.718
U軸移動量（mm）	18.783	23.215	25.514	31.563
a (mm)	5.000	5.000	5.000	5.000
b (mm)	55.000	55.000	55.000	55.000
c (mm)	3.014	3.734	4.106	5.071
d (mm)	13.861	17.138	18.830	23.295
K（mm）	0.007	0.007	0.013	0.013
D（mm）	13.854	17.131	18.817	23.282
f (mm)	8.902	8.936	8.955	8.923
g (mm)	86.639	86.642	86.718	86.657

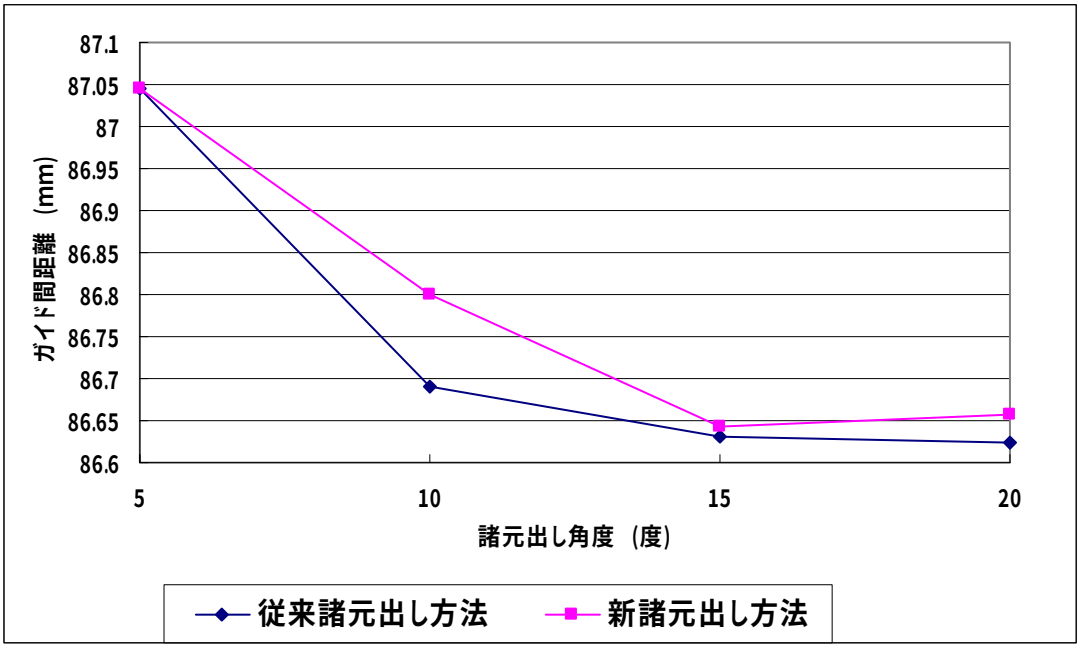


図 3.25　諸元出し角度による従来の諸元出し方法と新諸元だし方法のガイド間距離の比較

次に、上記で求められたガイド間距離 g を用いて、目的の角度にワイヤを傾け、加工を行った。従来の諸元出し方法と新諸元出し方法の加工角度の比較を行った。加工結果は以下の表 3.17 に示す。

表 3.17　従来の諸元出し方法と新諸元だし方法における加工角度の比較

設定角度（度）	5	10	15	20
従来方法の測定角度（度）	5.005	10.015	15.03	20.072
角度誤差（度）	0.005	0.015	0.03	0.072
新方法の測定角度（度）	5.004	10.011	15.022	20.045
角度誤差（度）	0.004	0.011	0.022	0.045

表 3.17 の結果をもとに従来の諸元出し方法と新諸元出し方法で設定角度における加工角度誤差の比較を図 3.26 に示す。

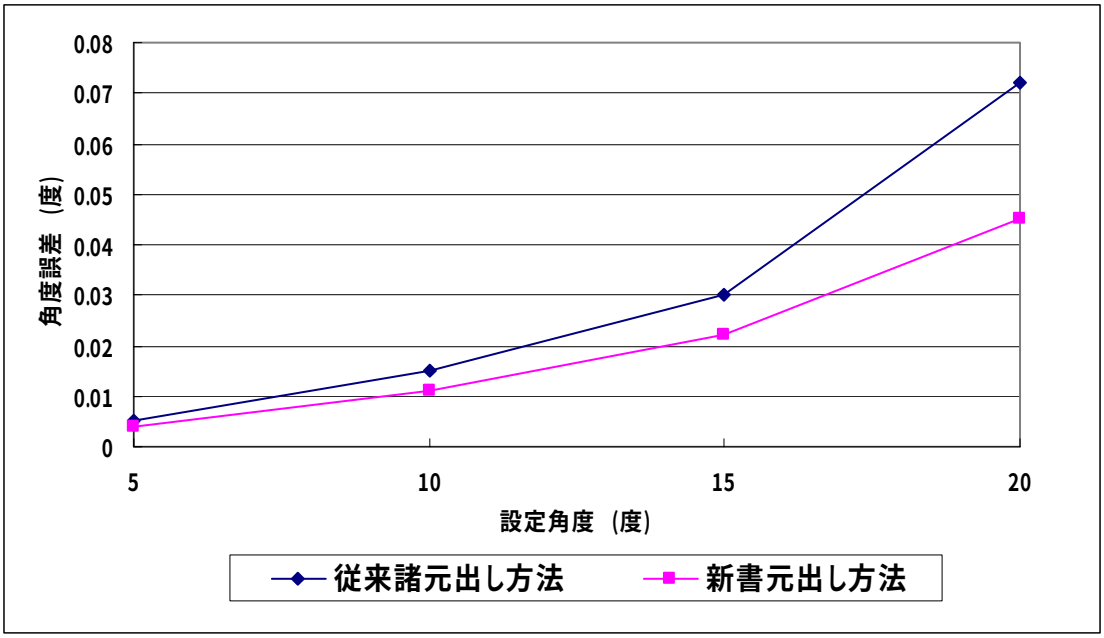


図 3.26　従来の諸元出し方法と新諸元だし方法で設定角度における加工角度誤差の比較

(5)　考察

図 3.26 のグラフにより、新諸元出し方法による加工実験では、従来の諸元出し方法に比べて、加工角度誤差に改善が見られた。よって、新諸元出し方法はテーパカット加工の加工精度向上に関して有効性を持ち、なおかつ全体的な加工角度誤差の変化幅を小さく抑えることが可能であることがこの実験よって得られた。しかし、新諸元出し方法を用いても、まだ加工角度誤差が見られた。その原因として、諸元出し又はワイヤを傾ける際、ワイヤになんらかの角度誤差が含まれ、加工角度誤差が発生しているのではないかと考えられる。しかし、この諸元出し方法では、ガイド間距離によってワイヤの傾き角度を決定しているので、ワイヤの傾き角度は見かけ上の角度となる。したがってワイヤ自体の傾き角度を正確に測定し、加工を行うことが必要ではないかと考えられる。

3.9　高速・高精度デジタル寸法測定器を用いた新たな測定方法の検討

3.9.1　高速・高精度デジタル寸法測定器を用いたワイヤの傾き角度の調査

(1)　実験目的

前節の従来諸元出し方法と新諸元出し方法の加工実験及び比較において、従来の諸元出し方法と新諸元出し方法で、諸元出し角度と加工後のワークの傾き角度に誤差が見られたのは、諸元出し角度に対して、ワイヤの傾き角度が正確に傾いていないのではないかと考えられる。したがって、ワイヤの傾き角度を正確に測定することによって、加工後のワークの傾き角度においても、改善されるのではないかと考えられる。この実験では、まずワイヤの傾き角度の調査を行った。

(2)　実験方法

まず、図 3.27 に示すように、Z 軸(高さ)を自由に変えられるガイドに高速・高精度デジタル寸法測定器を取り付け、新諸元出し方法における、ワイヤの傾き角度を調査した。Z 軸 30mm の 5mm 刻みで、X 方向の変化量をワイヤで読み取り、角度の測定を行った。

図 3.27　ガイドを取り付けた高速･高精度デジタル寸法測定器の外観図

(3)　実験結果

まず、新諸元出し方法を用いてガイド間距離および、U 軸移動量の決定を行った。その決定した値を表 3.18 に示す。

表 3.18　新諸元出し方法によって求められる各値

	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
諸元出し角度	5.000	5.000	10.000	10.000	15.000	15.000	20.000	20.000
高さ	70.100	87.966	70.100	87.725	70.100	87.097	70.100	87.456
U 軸移動量	6.133	7.696	12.361	15.468	18.783	23.337	25.514	31.831
a	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
b	55.000	55.000	55.000	55.000	55.000	55.000	55.000	55.000
c	1.035	1.293	2.069	2.587	3.053	3.800	4.243	5.264
d	4.521	5.680	9.114	11.412	13.836	17.194	18.830	23.419
f	9.845	9.737	9.684	9.657	9.157	9.185	9.544	9.497
g	87.966	87.714	87.725	87.639	87.097	87.119	87.456	87.445
測定角度	3.988	5.000	8.020	10.000	12.170	15.000	16.264	20.000

表 3.18、によって求められた値を参考にして、ワイヤを傾ける際に必要な U 軸移動量を決定し、ワイヤを傾けたまま高速・高精度デジタル寸法測定器による測定を行った、その各諸元出し方法おける角度測定結果を表 3.19 に示す。

表 3.19　高速・高精度デジタル寸法測定器における角度測定結果

目的角度	5	10	15	20
諸元出し角度　5 度	5.022	10.068	15.144	20.235
角度誤差	0.022	0.068	0.144	0.235
諸元出し角度　10 度	5.048	10.108	15.167	20.307
角度誤差	0.048	0.108	0.167	0.307
諸元出し角度　15 度	5.057	10.138	15.254	20.314
角度誤差	0.057	0.138	0.254	0.314
諸元出し角度　20 度	5.068	10.157	15.265	20.335
角度誤差	0.068	0.157	0.265	0.335

表 3.19 から得られた測定角度誤差をグラフ化したものを図 3.28 に示す。

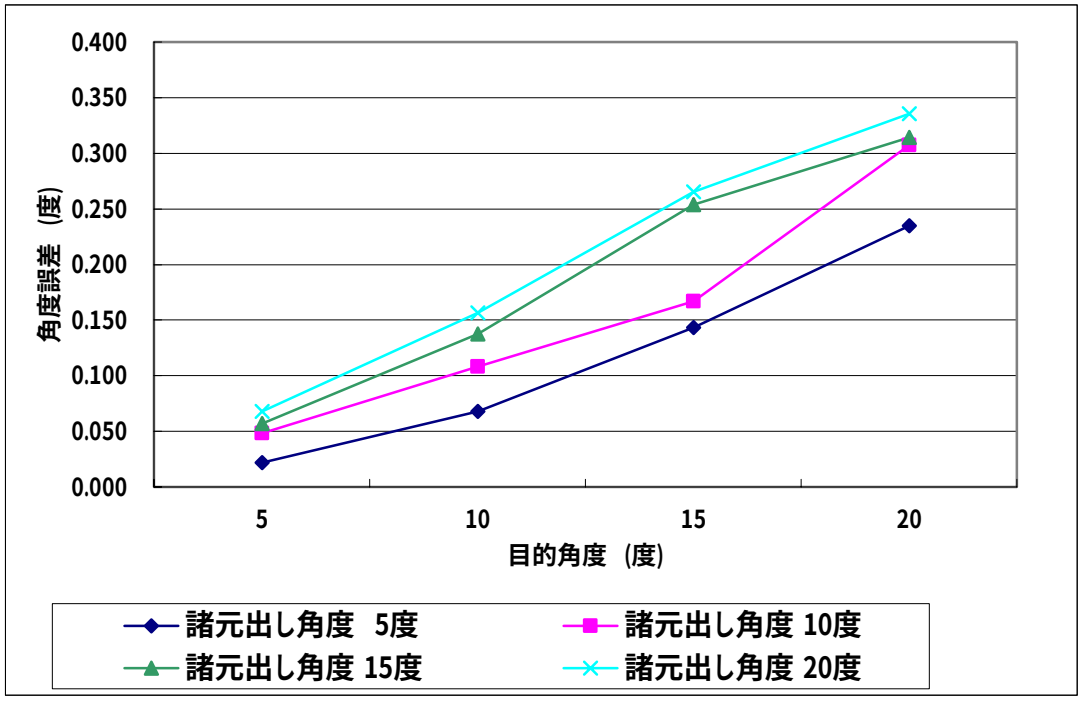


図 3.27　各諸元出し角度における高速・高精度デジタル寸法測定角度結果

(5)　考察

諸元出し段階においては、諸元出し角度は目的の角度になっているのに対して、高速・高精度デジタル寸法測定器によって求められた測定角度は図 3.28 を見てもわかるように大きく傾いていることがわかる。その要因として、ワイヤの強さ考えられる。しかし、今回、使用した Z 軸を変化させるガイドが正確なものでないことも分かった。垂直に張ったワイヤを高さ 100mm の 5mm 刻みで 3 段階に分けて、X の変化量を見たところ表 3.20 のようになった。

表 3.20　垂直に張ったワイヤの高速・高精度デジタル寸法測定結果

測定高さ (mm)	実験 1 (mm)	実験 2 (mm)	実験 3(mm)
0	0.000	0.000	0.000
5	0.026	0.026	0.027
10	0.042	0.044	0.043
15	0.059	0.063	0.060
20	0.072	0.073	0.065
25	0.074	0.077	0.066
30	0.073	0.076	0.066
35	0.075	0.077	0.070
40	0.080	0.084	0.078
45	0.092	0.095	0.086
50	0.104	0.107	0.099
55	0.117	0.120	0.112
60	0.128	0.132	0.123
65	0.143	0.146	0.136
70	0.160	0.164	0.155
75	0.176	0.181	0.172
80	0.196	0.199	0.188
85	0.211	0.216	0.199
90	0.220	0.225	0.206
95	0.227	0.231	0.212
100	0.231	0.236	0.215

表 3.20 をグラフ化したものを図 3.28 に示す。

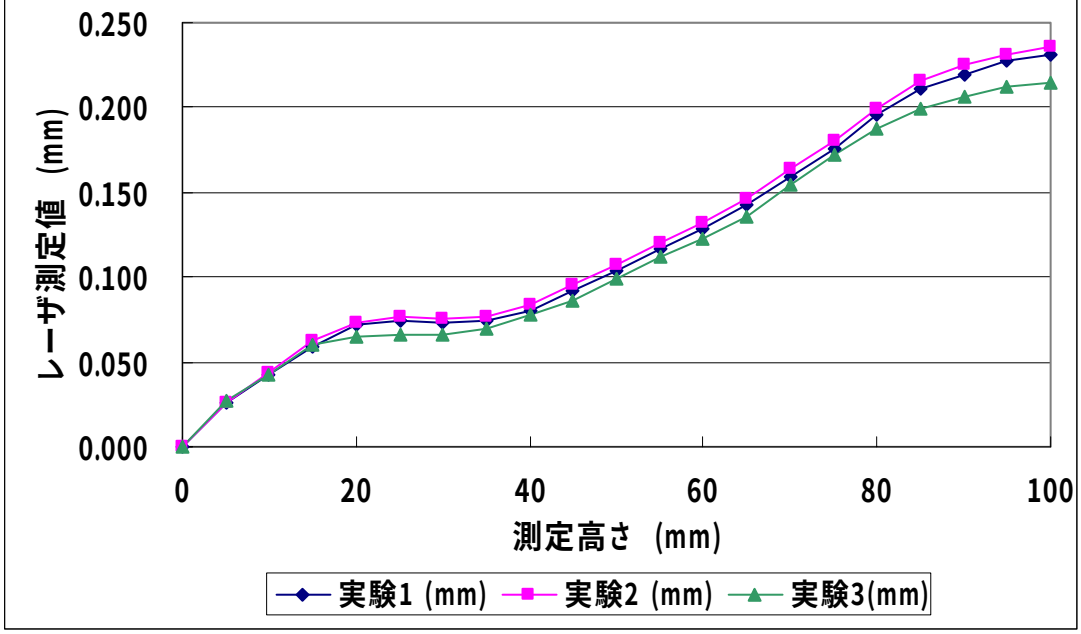


図 3.28　垂直に張ったワイヤの高速・高精度デジタル寸法測定結果

図 3.28 から見てわかるように垂直にワイヤを張ったにもかかわらず、高速・高精度デジタル寸法測定値の X 軸方向の変化量がかなり変化しているのは問題であると判断した。その要因として、Z 軸を上げる際、ガイドがたわむのと、上下するガイドの軸が変化しているためだと考える。したがって、測定する場所によって、ワイヤの傾き角度にも大きな影響与え、また加工後のワークの傾き角度にも影響を与えるのではないかと考えられる。よってこのレーザ測定器を用いたワイヤの傾き角度実験は無理であると判断した。

3.9.2　高速・高精度デジタル寸法測定器を用いてワイヤの幅の変化によるワイヤ傾き角度の調査及び加工実験

(1)　実験目的

前節の実験において、高速・高精度デジタル寸法測定器を上下させる際に誤差が発生してしまうという問題が起こった。しかし、今回の実験ではワイヤを傾ける際に発生するワイヤ幅の変化(図 2.29)を利用してワイヤの傾き角度を求めることを提案した。ワイヤ幅の変化量は

$$K = 0.2\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)$$

によって理論的に計算できるので正確なワイヤ傾き角度を決定することができるのではないかと考えた。設定角度とワイヤ幅の関係は図 3.29 に示す。また今回はレーザ測定器を上下させるガイドも等必要ないため、レーザ測定器を直接テーブルに置くため、誤差が発生する可能性は少ないと思われる。よってこの方法を使えば、正確にワイヤの傾き角度を知ることが可能ではないかと考えた。

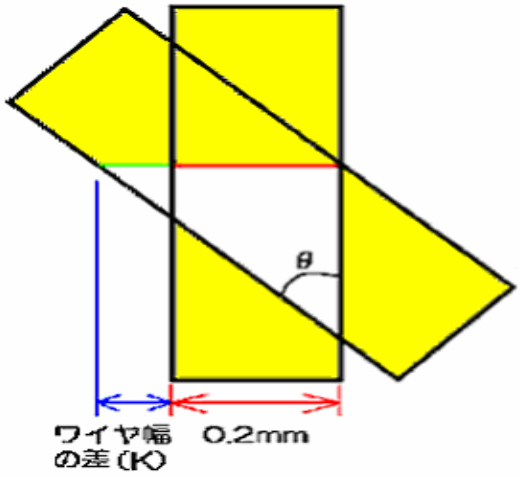


図 2.29　ワイヤを傾ける際に発生するワイヤ幅の差

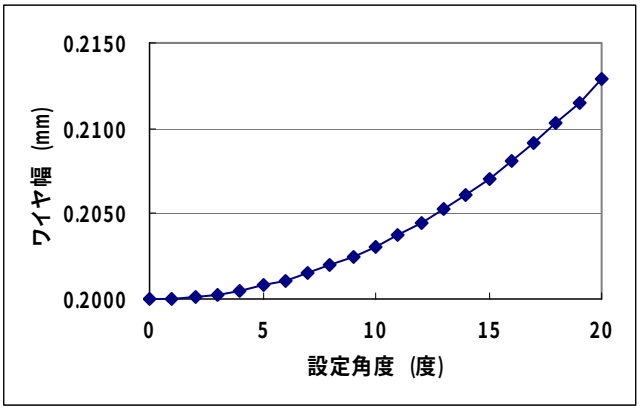


図 3.30　設定角度とワイヤ幅の関係

(2)　実験方法

まず、自動諸元出し機能を用いて、U 軸移動量を決定するガイド間距離を求める。その求められたガイド間距離を使って従来諸元出し方法と新諸元出し方法での諸元出し角度を垂直度計を用いて求める。それと同じ条件で高速・高精度デジタル寸法測定器を用いて、傾けたワイヤの幅を読み取り、ワイヤの傾き角度を求める。また今回はその条件を使って、板厚 10mm の SKD-11 のワークにワイヤを目的の傾き角度に傾けたまま切り込む加工も同時に行った。よって、従来諸元出し角度、新諸元出し角度、ワイヤ幅の変化を利用したワイヤの傾き角度、加工後、ワークの傾き角度の比較を行い、それらの関係がどのようにな

っているか調査を行った。

(3) 実験結果

表 3.21 自動諸元出し機能によって求められる各値

諸元出し角度	5	10	15	20
Z3	77.712	77.651	77.521	77.493
Z4	9.247	9.139	9.104	9.095
g	86.959	86.790	86.625	86.588

表 3.22 従来諸元出し方法によって求められる各値

諸元出し角度	5	10	15	20
高さ	86.959	86.790	86.625	86.588
U 軸移動量	7.608	15.303	23.211	31.515
a	5	5	5	5
b	55	55	55	55
c	1.247	2.496	3.779	5.124
d	5.622	11.319	17.183	23.329
f	9.251	9.145	9.097	9.073
g	86.948	86.725	86.583	86.557
実際の諸元出し角度	5.001	10.007	15.007	20.007

表 3.23 新諸元出し方法によって求められる各値

諸元出し角度	5	10	15	20
高さ	86.959	86.790	86.625	86.588
U 軸移動量	7.608	15.303	23.211	31.515
a	5	5	5	5
b	55	55	55	55
c	1.247	2.496	3.779	5.124
d	5.622	11.319	17.183	23.329
K	0.001	0.003	0.007	0.013
D	5.621	11.316	17.176	23.316
f	9.254	9.150	9.104	9.083
g	86.963	86.755	86.628	86.618

実際の諸元出し角度	5.000	10.004	14.999	19.994
差	0.000	0.004	-0.001	-0.006

表 3.24　ワイヤ幅を利用した高速・高精度デジタル寸法測定器の測定結果

諸元出し角度	5	10	15	20
U 軸移動量	7.601	15.293	23.224	31.514
ワイヤ幅	0.201	0.203	0.207	0.213
角度	5.030	10.047	15.067	20.082
ガイド間距離	86.354	86.316	86.273	86.199

表 3.25　加工後のワークの傾き角度の測定結果

設定角度	5	10	15	20
加工測定角度	5.044	10.055	15.074	20.088
角度差	0.044	0.055	0.074	0.088

設定角度と求められた各角度の差をグラフ化したものを図 3.30 に示す。

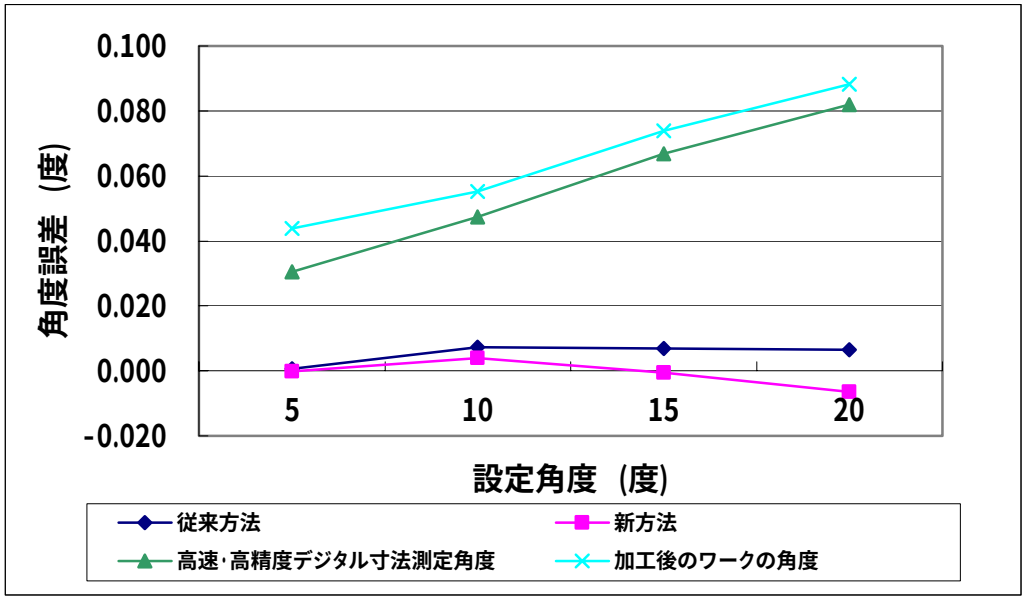


図 3.31　求められた各方法における測定角度結果

(5)　考察

図 3.30 から見てもわかるように従来諸元出し方法、新諸元出し方法に比べて、高速・高精度デジタル寸法測定器を用いたワイヤ幅の変化量によるワイヤ傾き角度を設定したほうが明らかに加工後のワークのテーパ角度に改善が見られた。それはワイヤの傾き角度が従来諸元出し、新諸元出し方法と比べて、高速・高精度デジタル寸法測定器を用いたワイヤ幅の変化量による傾き角度の設定のほうが実際のワイヤ傾き角度に近い値が得られることがこの実験で見られた。従来のテーパ加工においてはガイド間距離によるテーパ角度の設定が行われていたため、実際にワイヤの傾き角度が何度で加工されているのか知ることができなかったため、加工後のワークのテーパ角度に大きな誤差を発生する要因となった。しかし、今回提案したワイヤ幅によるワイヤ傾き角度を設定する方法を用いることにより、ガイド間距離によるテーパ角度の設定が必要としなくなり、高速・高精度デジタル寸法測定器を用いて、ワイヤの傾き角度が目的のテーパ角度に設定することが可能でなった。

今回、テーパ加工の加工精度向上にはワイヤの傾き角度を正確に傾けることが大きなテーマであった。加工後のワークのテーパ角度を目的のテーパ角度に加工するためには実際加工するワイヤの傾き角度を正確に測定することがテーパ加工の加工精度向上につながるのではないのかと考えた。

この実験で高速・高精度デジタル寸法測定器を用いることにより、ワイヤ幅の変化量を知ることができ、またワイヤの傾き角度を求めることが可能となった。更に 20 度以上の広角テーパ加工においても、この方法を適用することが可能であることから、ワイヤ放電加工におけるテーパ加工の加工精度向上させることが十分に期待できる。

3.10　結言

これまで、加工実験のほか、レーザ測定器等を用いて、ワイヤ放電加工におけるテーパカット加工の加工精度向上について研究を行ってきた。テーパカット加工の加工精度に及ぼす誤差の要因は、実際のワイヤの傾き角度を正確に傾けることが結果として言え、前述の 3.9.2 レーザ測定器を用いてワイヤ幅の変化におけるワイヤの傾き角度の調査及び加工実験で述べたように、従来諸元出し方法、新諸元出し方法を用いて角度の設定を行うよりも、レーザ測定器を用いたワイヤ幅の変化量によるワイヤ傾き角度の設定で行ったほうが加工後、ワークのテーパ加工面の角度に近い値で加工できることがこの研究によって証明された。

したがって今後はワイヤ放電加工におけるテーパカット加工を行う際は今まで垂直度計を用いて、ガイド間距離を決定し、そのガイド間距離を用いてワイヤの傾き角度の設定を行ってきたが、今後はレーザ測定器を用いて、ワイヤが目的の角度のワイヤ幅になったとき、止まるようなシステムを構築し、ワイヤカット放電加工におけるテーパカット加工の加工精度向上を目指していく。

前回実験において、新諸元出し方法を提案したことがワイヤ放電加工におけるテーパカット加工における加工精度向上に大きな発見であったが、ワイヤの傾き角度を設定する際、それほど、ワイヤの傾き角度自体、改善が見られないことが筆者の実験で分かった。

3.9.1 のレーザ測定器を用いたワイヤ傾き角度の調査においてはワイヤの傾き角度を知る上では現段階においてはかなり良い方法ではあったが、上下させるガイドがあまり精度の良いものではなく、図 3.28 を見ても分かるように、かなりの測定誤差を含んでいることが分かり、ワイヤ放電加工におけるテーパカット加工の加工精度向上には繋がらないと判断した。

3.9.2 で提案したワイヤ幅の変化量によるワイヤ傾き角度の決定においては、ワイヤの傾き角度を知る上では現段階において最善の方法であり、ガイドを使ったワイヤの傾き角度の設定よりは正確なワイヤ傾き角度を決定することが可能である。またこの方法を用いれば、テーパカット加工がワイヤの傾き角度が大きくなればなるほど、加工後のワークのテーパ加工面も誤差大きくなるという問題も解決され、広角テーパ加工においても加工精度向上に繋がっていくのではないかと考えられる。

第4章　結論

本研究は、ワイヤ放電加工における加工精度向上の中のセカンドカット加工の加工特性とテーパカット加工における加工精度向上について研究を行った。従来加工法の調査、原因追求のための調査実験および加工実験を行った後、数式等を用いた新しい方式の検討など様々な観点から調査、実験を行った結果、以下の結果に至った。

第2章　セカンドカット加工の加工特性

- セカンドカット加工は加工送り速度を上げていくと加工面粗さが荒くなる傾向が見られた。
- セカンドカット加工では加工効率で考えた場合、切り込み量を小さくとり、加工送り速度を上げて加工するほうが良い。
- 加工送り速度と切り込み量に対する単位時間あたりの除去量では加工限界が見られた。
- 今回の実験では加工送り速度と切り込み量における最適除去厚さの関係式を導き出すことができた。

第3章　テーパカット加工の加工精度向上

- ガイド間距離が一定の場合、ワイヤ傾き角度が大きくなるにつれて、加工後のワークのテーパ加工面の傾き角度誤差も大きくなる。
- 提案された新諸元出し方法ではテーパカット加工の加工精度向上には多少の改善は望めるが、あまり変化はない。
- 今回、新しく使った高速・高精度デジタル寸法測定器はワイヤ幅を正確に図ることができ、今後、広角テーパ加工においても改善が望める。

以上、本研究はセカンドカット加工の加工特性とテーパカット加工の加工精度向上において、加工精度に及ぼす誤差の要因を明らかにし、その改善策を検討することによってそれぞれの加工精度が向上することを示したものである。

謝辞

本研究及び本論文は、小林和彦教授のご指導の下に行われ、完成するに至りました。終始ご指導いただきました同教授に厚く御礼を申し上げます。

また、特殊加工研究室の方々には本論文の完成に際し、ご援助、ご協力を頂いたことに関して感謝し、御礼を申し上げる次第であります。

参考文献

斎藤長男　小林和彦　仙北谷英次
「ワイヤカット放電加工技術」　（1971）

三菱電機(株)　／　斎藤長男
「放電加工のしくみと 100%活用法」　(1979)

眞鍋明　葉石雄一郎
「ワイヤカット放電加工」　(1997)

堀端勇介
「ワイヤ放電加工　セカンドカットによる加工特性」　（2002）